



Messbericht Ammoniak

Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2024

Autorin

Dr. Nadine Engbersen

Geprüft

Ursina Schwyn

Titelbild

Daria Göllnitz



Umwelt
Zentralschweiz

Zusammenfassung

Ammoniak (NH_3) 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 und somit Verluste von wertvollem Stickstoff-Dünger. Die Emissionen 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 Luftreinhalte-Verordnung (LRV) darstellen.

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz bewegten sich im Jahr 2023 auf einem ähnlichen Niveau wie im von Niederschlägen geprägten Jahr 2021, aber tiefer als im Jahr 2022. Da es im Frühling des Jahres 2023 jedoch zu qualitätsbedingten Messausfällen kam, lässt sich keine Aussage über den Verlauf der Konzentrationen zu dieser Jahreszeit machen. Im Sommer und Herbst befanden sich die Konzentrationen je nach Messpunkt auf erhöhtem Niveau. Zum Teil waren deutliche Herbstpeaks sichtbar.

Im Jahr 2024 waren die Ammoniakkonzentrationen niedriger als in den Vorjahren. Der typische Frühlingspeak war nur an wenigen Messpunkten zu sehen, jedoch war ein deutlicher Herbstpeak auszumachen.

Die Ammoniakkonzentrationen von 2010 bis 2024 überschreiten im mehrjährigen Mittel den Critical Level für höhere Pflanzen von $3 \mu\text{g m}^{-3}$ in 16 von 19 langjährigen Messgebieten zum Teil sehr deutlich. Selbst wenig belastete Messpunkte in der Nähe empfindlicher Ökosysteme (Zigerhüttli, Fräbühl und Zugerberg) zeigen im mehrjährigen Jahresmittel eine Überschreitung des Critical Levels von $1 \mu\text{g m}^{-3}$ für empfindliche Moose und Flechten.

Die Trendberechnungen für die Messgebiete im Kanton Luzern zeigen eine langfristige Zunahme der Ammoniakkonzentration in den Messgebieten Eschenbach, Neudorf und Neuenkirch ($+0.14 / +0.09 / +0.15 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$, statistisch signifikant). Die Messgebiete des Zentralschweizer Ressourcenprojekts mit Daten ab 2010 zeigen langfristig gleichbleibende bis abnehmende Tendenzen. Einzig das Messgebiet Obwalden zeigt eine statistisch signifikante Zunahme ($+0.13 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). 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 ($+0.05 / +0.05 / +0.05 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$).

Sowohl Witterungsschwankungen als auch die Reduktion von Vorläuferstoffen können gemäss Modellierungen die langfristigen positiven Trends nur teilweise erklären. Gemäss der aktuellen Datenlage wird vermutet, dass die Verringerung der Ammoniakemissionen rund um mehrere Messpunkte zu gering ist, um die Ammoniakimmissionen ganzjährig und langfristig zu senken. Es ist daher angebracht, weiterhin emissionsmindernde Massnahmen zu verfolgen (z.B. bei Baugesuchen von Ställen auf emissionsmindernde Massnahmen zu achten). Als Beispiel können Massnahmen in umliegenden Staaten dienen wie beispielsweise Dänemark, die in der Reduktion von Ammoniakemissionen eine Vorreiterrolle einnehmen.

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.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einleitung	1
1.1. Emissionen und Immissionen	2
1.2. Auswirkungen von Ammoniak	4
1.3. Landwirtschaft in der Zentralschweiz	4
1.4. Politische Einbettung und Massnahmen	6
1.5. Umgang mit Ammoniak im Ausland	8
2. Methodik	9
2.1. Übersicht der Messungen in der Zentralschweiz	10
2.2. Messperioden aller Messpunkte	12
2.3. Qualitätsprobleme im Jahr 2023	15
2.4. Richtwerte und Beurteilung	16
3. Resultate	17
3.1. Meteorologie 2023 und 2024	17
3.2. NH ₃ -Belastung	18
3.2.1. Mittlerer Jahresgang	18
3.2.2. Mehrjahresmittelwerte	20
3.2.3. Verlauf der Ammoniakkonzentration	23
3.2.4. Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung	26
3.3. Trendanalyse	28
3.3.1. Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	28
3.3.2. Jahresmittel-Trends nach Messpunkten	30
4. Diskussion und Schlussfolgerungen	32
5. Anhang	35
5.1. Detaillierte Standortbeschreibungen	35
5.1.1. Wauwil, Luzern	35
5.1.2. Eschenbach, Luzern	35
5.1.3. Neudorf, Luzern	36
5.1.4. Schüpfheim, Luzern	37
5.1.5. Neuenkirch, Luzern	37
5.1.6. Root, Michaelskreuz, Luzern	38
5.1.7. Nidwalden	39
5.1.8. Uri	39
5.1.9. Obwalden	40
5.1.10. Schwyz	41
5.1.11. Zug	42
5.1.12. Rigi-Seebodenalp (NABEL)	44

5.2.	Charakterisierung der Messpunkte	46
5.3.	Jahresmittel nach Messgebieten	49
5.4.	Jahresgang nach Messgebieten (2018 – 2024).....	50
5.5.	Trendberechnungen	52
5.5.1.	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	52
5.5.2.	Jahresmittel-Trends nach Messpunkt	53
5.6.	Anmerkungen zur statistischen Analyse	59
5.7.	Übersicht über die Messprogramme	61

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).¹ 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.² Der gesamtschweizerische Ammoniak-Immissionsmessbericht kommt weiter zum Schluss, dass die Ammoniakkonzentrationen seit dem Jahr 2000 weder zu- noch abgenommen haben (Abbildung 2).³

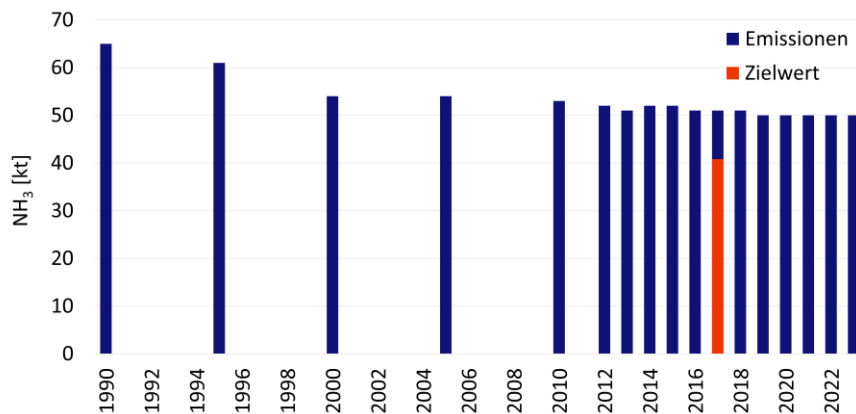


Abbildung 1: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft in der Schweiz von 1990 bis 2023.⁴ Der rote Balken zeigt den vom BAFU kommunizierten Zielwert für 2017.

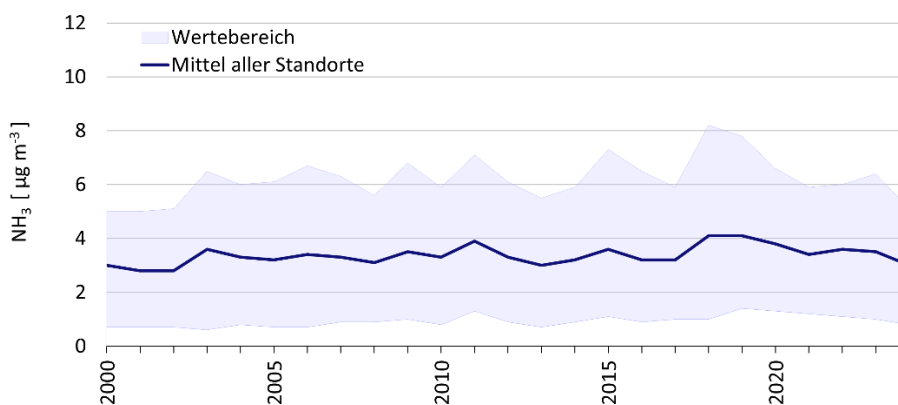


Abbildung 2: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen von 12 Immissions-Messstandorten in der Schweiz, an denen seit 2000 durchgehend gemessen wird.

¹ Seitler, E. u. a., *Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2019*. (FUB - Forschungsstelle für Umweltbeobachtung., 2021).

² Rihm, B. und Achermann, B., *Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE)*, Environmental studies no. 1642 (Federal Office for the Environment, 2016), 78.

³ Seitler, E. u. a., *Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2024*. (FUB - Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, 2025).

⁴ Bass, A.-A. u. a., *Switzerland's informative inventory report 2024 (IIR): Submission under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution* (Federal Office for the Environment BAFU, 2024).

1.1. Emissionen und Immissionen

In der Schweiz haben zwei Drittel der Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme ihren Ursprung in Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft.⁵ 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 %).⁶

Im Jahr 2021 betrugen diese Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft landesweit 41.3 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ bzw. 50.1 kt NH_3 (Abbildung 1).⁶ 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.⁷ 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 die Ammoniakkonzentrationen in der Umgebung stärker beeinflussen als am Tage. Zusätzlich fehlen im Winter häufig die atmosphärischen Turbulenzen, wodurch sich Ammoniakemissionen nicht so rasch verdünnen können wie in den warmen Monaten.

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.⁸ Die zeitliche Dauer und das Ausmass von Verschmutzungen in einem Stall sollten also möglichst minimiert werden, was mit entsprechenden baulichen Massnahmen oder Weidehaltung erreicht werden kann. In einem Kuhstall kann beispielsweise der Fressbereich erhöht und mit Abtrennbügel gestaltet werden. Laufflächen

⁵ BAFU, „Stickstoffhaltige Luftschadstoffe beeinträchtigen auch die Biodiversität“, 2025, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/auswirkungen-der-luftverschmutzung/auswirkungen-auf-die-oekosysteme/stickstoffhaltige-luftschadstoffe-beeintraechtigen-auch-die-biod.html>.

⁶ Kupper, Th. u. a., *Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020*. (Berner Fachhochschule, Schweizer Bundesamt für Umwelt, 2022).

⁷ Bass, A.-A. u. a., *Switzerland's informative inventory report 2024 (IIR): Submission under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution*.

⁸ Sigurdarson, J.J. und Svane, S., *The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture*, 17, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. (2018), 241–58, <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1>.

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.⁹ Bei Schweine- und Geflügelställen kann neben weiteren baulichen Massnahmen eine Abluftreinigungsanlage eingebaut werden.¹⁰

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).¹¹

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 Schleppschlauch 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.¹² Dieses sagt voraus, dass eine Erhöhung der Temperatur von 1 °C theoretisch zu einem Ammoniakanstieg von 13 % in der Luft führt.

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".¹³ Grange et al. (2023) berechneten, dass bei identischen Ammoniakemissionen der Einfluss des Wetters die gemessene Immission um bis zu einem Drittel verändern kann.¹³ 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 der Vorläuferstoffe war in der Schweiz in den letzten drei Jahrzehnten der Fall, was als

⁹ Umwelt Zentralschweiz, „Rindviehstall der Zukunft“, 2023, <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/news/rindviehstall-der-zukunft/>.

¹⁰ Kupper, Th. u. a., *Abluftwäscher zur Reduktion von Ammoniakemissionen aus Schweine- und Geflügelställen* (Berner Fachhochschule, 2022).

¹¹ Spuhler, M. u. a., *Abdeckung von Güllelagern zur Reduktion von Emissionen*. Merkblatt von KOLAS und KVV. (Agridea, 2022).

¹² Latsch, A. u. a., „Ausbringtechnik bei Hof-, Recycling- und Mineraldüngern.“, in *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD)*, Kapitel 5 (2017).

¹³ Grange, S.K. u. a., *Meteorologically normalised long-term trends of atmospheric ammonia (NH₃) in Switzerland/Liechtenstein and the explanatory role of gas-aerosol partitioning*, 900, Science of The Total Environment (2023), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165844>.

grosser Erfolg in der Luftreinhaltung angesehen wird. 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 dem Niveau von 2004 wären.¹⁴

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. 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 und hat somit negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.¹⁵ Schliesslich ist Lachgas (N_2O), welches durch chemische Transformation von Ammoniak entstehen kann, ein klimawirksames Gas mit einem Treibhausgaspotential von 273 CO_2 -eq.^{16 17}

Damit haben Ammoniakemissionen, welche überwiegend aus der Landwirtschaft stammen, gleich auf mehrere natürliche Systeme negative Auswirkungen. Dazu gehören 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.¹⁸

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 (Abbildung 3 und Abbildung 4). Auf den Kunst- oder Naturwiesen 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 Rindvieh, nutzbar gemacht werden. Der Kanton Luzern fällt ausserdem durch eine hohe Anzahl von Schweinen auf (Abbildung 5).

¹⁴ Grange, S.K. u. a., *Meteorologically normalised long-term trends of atmospheric ammonia (NH_3) in Switzerland/Liechtenstein and the explanatory role of gas-aerosol partitioning*.

¹⁵ Swiss TPH, „Interaktive Grafik zu den Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit.“, 2025, <https://www.swisstph.ch/de/projects/ludok/healtheffects/>.

¹⁶ IPCC, *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2021), Table 7. SM.7.

¹⁷ Das heisst, dass Lachgas (N_2O) bezüglich Treibhauswirkung 273 Mal so schädlich ist wie die gleiche Menge CO_2 .

¹⁸ Bauer, K., „1.2-Millionen-Projekt gegen Schweinegestank sorgt für rote Köpfe“, *SRF News*, 2023, <https://www.srf.ch/sendungen/dok/stunk-wegen-geruch-1-2-millionen-projekt-gegen-schweinegestank-sorgt-fuer-rote-koepfe>.

Die Wiesen werden in der (Zentral-)Schweiz vor allem mit dem anfallenden Hofdünger wie Gülle gedüngt, und zwar nach jedem Schnitt. Die erste Gabe 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. März und November.¹⁹

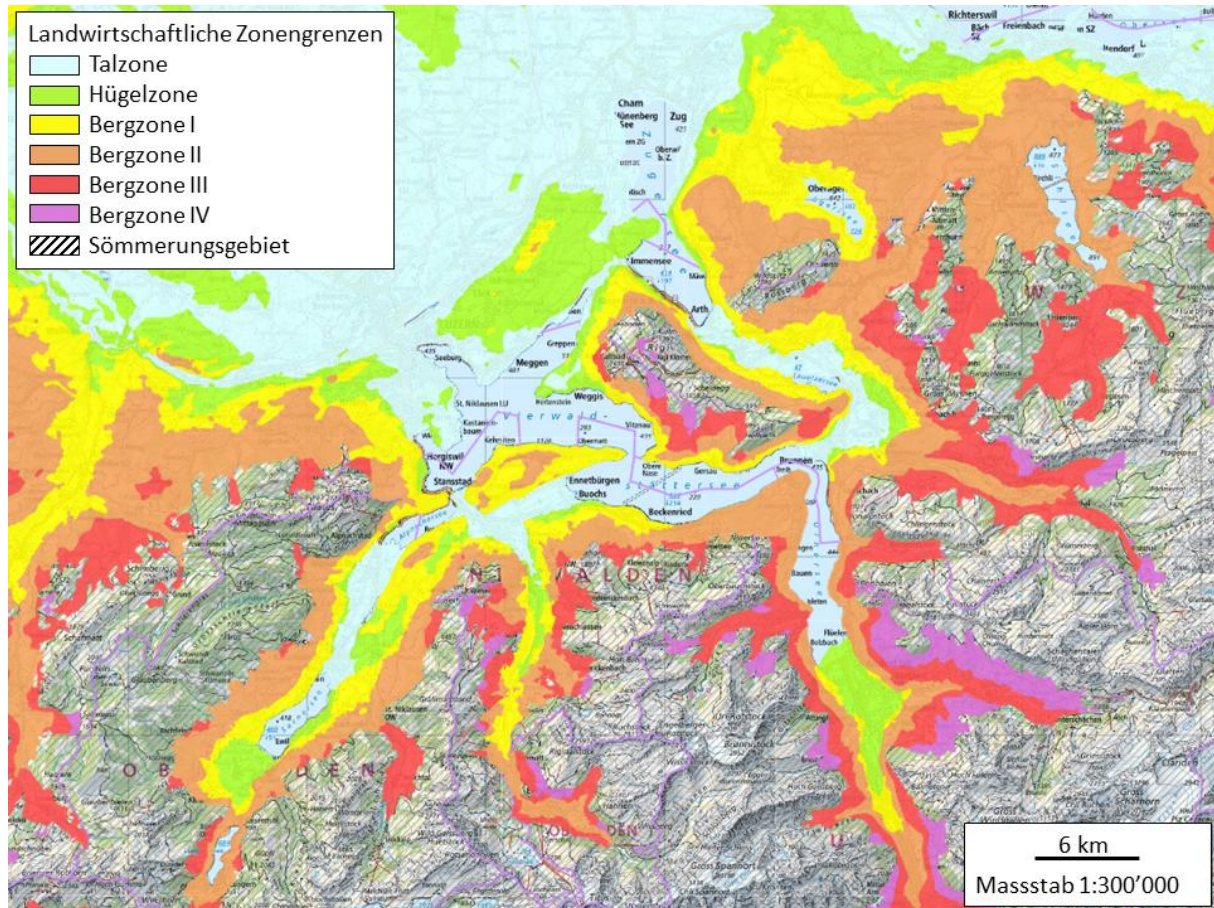


Abbildung 3: Landwirtschaftszonen in der Zentralschweiz. Im Unterschied zum Mittelland ist viel Fläche als Hügel- und Bergzone klassifiziert.²⁰

¹⁹ Huguenin-Elie, O u. a., „Düngung von Grasland“, in *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD)*, Kapitel 9 (2017).

²⁰ Swisstopo, „Landwirtschaftliche Zonengrenzen. Letzer Zugriff: 20.06.2025“, 2025.

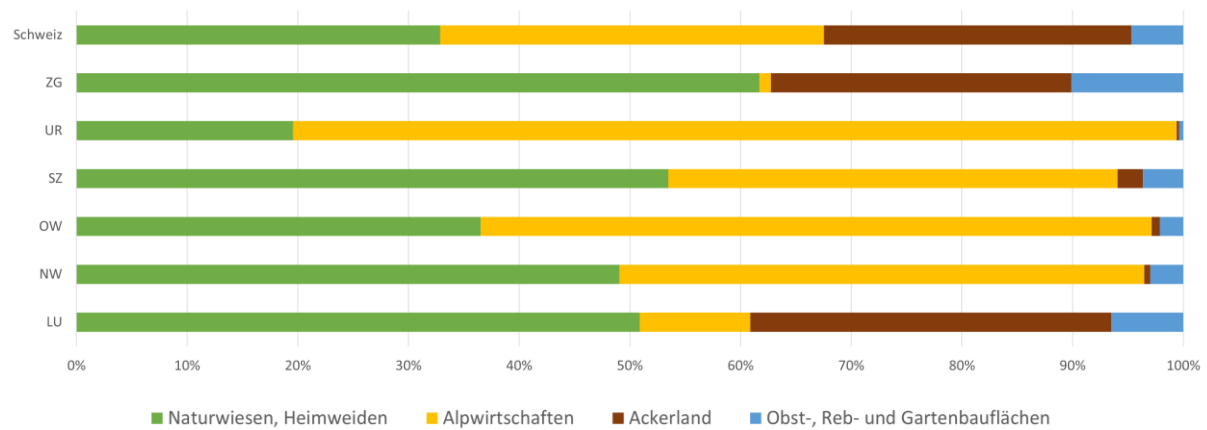


Abbildung 4: Landwirtschaftliche Nutzung in den verschiedenen Zentralschweizer Kantonen und der Schweiz.²¹

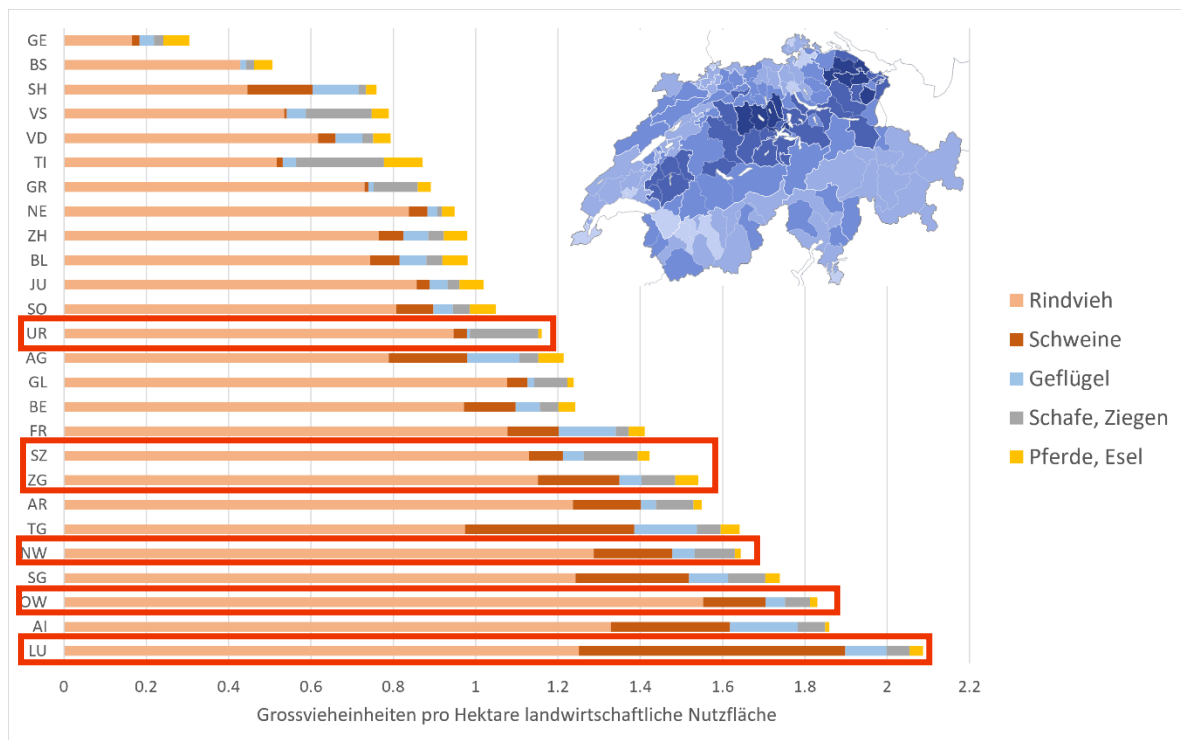


Abbildung 5: Tierzusammensetzung und -bestand in Grossvieheinheiten (GVE) pro Hektare landwirtschaftliche Nutzfläche aus dem Jahr 2024 in den verschiedenen Kantonen der Schweiz. Rot markiert sind die Kantone der Zentralschweiz, welche in diesem Bericht behandelt werden. Eine Milchkuh wird mit einer GVE angerechnet, eine säugende Sau mit Ferkel mit 0.55 GVE.²²

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

²¹ Bundesamt für Statistik, „Die Bodennutzung in der Schweiz“, 2025, <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.assetdetail.32267703.html>.

²² Bundesamt für Statistik, „Landwirtschaftliche Strukturerhebung 2024“, 2024, <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/land-forstwirtschaft/landwirtschaft.gnpdetail.2025-0411.html>.

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 26).

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. 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.²³ Zusätzlich zum Massnahmenplan wurde im Kanton Luzern zwischen 2009 und 2014 das «Ressourcenprojekt Stickstoff», welches zur Reduktion der Ammoniakverluste und Erhöhung der einzelbetrieblichen Stickstoff-Effizienz umgesetzt wurde.²⁴

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 «Ammoniak 2016 bis 2030» erarbeitet und verabschiedet.²⁵ Seit 2021 läuft in der ganzen Zentralschweiz ein neues Ressourcenprojekt zur Reduktion der Ammoniak- und Geruchsemissionen.²⁶ Das Projekt hat zum Ziel, den Konflikt um Geruchsemissionen zu lösen. Aus diesem Projekt ist bisher der Muster-Rindviehstall in Merlischachen SZ, ein Muster-Schweinestall in Ufhusen LU²⁷ sowie die erste Cowtoilet der Schweiz²⁸ hervorgegangen.

Im Rahmen der Agrarpolitik 22+ (AP22+) wurde der Absenkepfad Nährstoffe eingeführt, mit dem Ziel die Verluste von Stickstoff um 15 % und von Phosphor um 20 % bis zum Jahr 2030 zu reduzieren. Als Bezugsgrösse gilt der Durchschnitt aus den Jahren 2014–2016. Der Absenkepfad beruht einerseits aus Massnahmen, welche in den Direktzahlungsprogrammen beschlossen wurden, andererseits vertraut der Bund auf die Eigeninitiative der Branche.²⁹ Im Jahr 2022 wollte der Bundesrat mit dem Inkrafttreten der revidierten Luftreinhalte-Verordnung ein Schleppschlauch-Obligatorium einführen. Dieses wurde unter anderem wegen Lieferengpässen der entsprechenden Maschinen auf 2024 verschoben und gilt landesweit seit

²³ uwe Luzern, *Ammoniak und Massnahmenplan II* (2023), <https://uwe.lu.ch/themen/luft/ammoniak>.

²⁴ Agrofutura und AfU OW, *Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz: Schlussbericht 2015* (Agrofutura, 2016).

²⁵ Amt für Umwelt Kanton Zug, *Massnahmenplan Ammoniak 2016-2030 Kanton Zug* (2016), <https://zg.ch/dam/jcr:ed081744-fec4-4dfb-8d67-cbae92af2507/Massnahmenplan%20Ammoniak%20Kanton%20Zug%2009-04-2016.pdf>.

²⁶ Umwelt Zentralschweiz, «Ammoniak und Gerüche in der Landwirtschaft reduzieren», 2023, <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/news/ammoniak-und-gerueche-in-der-landwirtschaft-reduzieren/>.

²⁷ Umwelt Zentralschweiz, «Schweinestall der Zukunft», 2024, <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/news/schweinestall-der-zukunft/>.

²⁸ Umwelt Zentralschweiz, «Die erste Cowtoilet der Schweiz im Praxistest», 2025, <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/news/die-erste-cowtoilet-der-schweiz-im-praxistest/>.

²⁹ Bundesamt für Landwirtschaft, «Zielvereinbarungen zum Absenkepfad Nährstoffverluste», 2024, <https://www.blw.admin.ch/de/zielvereinbarungen-absenkepfad-naehrstoffverluste>.

dem 01.01.2024.³⁰ 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.³¹

1.5. Umgang mit Ammoniak im Ausland

Zusätzlich zu den Anforderungen der Genfer Luftreinhaltekonvention hat sich Deutschland verpflichtet, bis 2030 die Ammoniakemissionen um 29 % zu reduzieren gegenüber dem Jahr 2005³². Um dieses Ziel zu erreichen, unterliegen der Bau oder Umbau von intensiven Tierhaltungsanlagen einem Genehmigungsverfahren, wobei geprüft wird, ob die Anlagen nach dem Stand der Technik errichtet und betrieben werden. Für die einzelnen Tierkategorien sind Emissionsgrenzwerte vorgeschrieben, welche bezüglich Stallemissionen eingehalten werden müssen. Um die Grenzwerte nicht zu überschreiten, stehen verschiedenste Massnahmen zu Verfügung (wie z. B. rohproteinarme Mehrphasenfütterung bei Schweinen, Emissionsarme Ausbringung von Wirtschafts- und Mineraldünger, Separation von Wirtschaftsdünger in Fest- und Flüssiganteil, Güllevergärung in Biogasanlagen, Massnahmen im Stall). Im Rahmen des internationalen Abkommens zur Luftreinhaltung (NEC-Richtlinie) darf Deutschland ab 2010 maximal 550 kt NH₃ emittieren. Seit dem Jahr 2020 erreicht Deutschland dieses Ziel mehrheitlich. Grund dafür sind die z. T. stark gesunkenen Schweinezahlen sowie die Pflicht zur emissionsarmen Ausbringung von Harnstoffdüngern (einige Verfahren für die Gülleausbringung mit Breitverteiltern sind in Deutschland bereits seit 2016 verboten).³³ Für Wirtschaftsdünger, Geflügelmist und Mineraldünger gilt in Deutschland eine Frist von maximal 4 h, bis dieser eingearbeitet werden muss oder die Pflicht diesen mit Urease-Hemmern³⁴ zu bearbeiten um NH₃-Emissionen zu verhindern. Die Reduktion von NH₃-Emissionen aus Mineraldüngern trägt zu 51 % zur Gesamtreduktion der NH₃-Emissionen aus der Landwirtschaft zwischen 2016 und 2022 bei. Mehr als zwei Drittel dieser Emissionsreduktion ist auf die direkte Einarbeitung oder die Anwendung von Urease-Hemmern zurückzuführen.³⁵

Obwohl Deutschland ein Teilziel bereits erreicht hat, sind andere EU-Länder in der NH₃-Emissionsminderung noch weiter voraus. So hat z. B. Dänemark seine landwirtschaftlichen NH₃-Emissionen zwischen 2005 und 2023 um ~ 32 % gesenkt.^{36 37} Damit konnte Dänemark das gesteckte Ziel einer 27 % Reduktion bis 2030 bereits vorzeitig erreichen. Nebst einer Pionierrolle in der effizienteren Fütterungstechnik in der Schweinemast gilt in Dänemark auch schon seit 2003 ein Verbot der Gülleausbringung mit

³⁰ Schweizer Bauer, „Schleppschlauchpflicht auf 2024 verschoben“, 2021, <https://www.schweizerbauer.ch/politik-wirtschaft/agrarpolitik/schleppschlauchpflicht-auf-2024-verschoben/>.

³¹ Spuhler, M. u. a., *Abdeckung von Güllelagern zur Reduktion von Emissionen. Merkblatt von KOLAS und KVV*.

³² Umwelt Bundesamt, „Ammoniak, Geruch und Staub“, 2025, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/ammoniak-geruch-staub#rechtliche-grundlagen-und-minderungsziele>.

³³ Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, „Ammoniak-Emissionen: Landwirtschaft muss handeln“, 2025, <https://www.praxis-agrar.de/umwelt/klima/ammoniak-emissionen>.

³⁴ Das Enzym Urease setzt Harnstoff, der in Düngern enthalten ist, zu Ammoniak um. Wird das Urease Enzym gehemmt, verlangsamt sich dieser Prozess.

³⁵ Hu, Y. u. a., *Successful NH₃ abatement policies and regulations in German agriculture*, Science of The Total Environment (2024), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177362>.

³⁶ Aarhus University, *Annual Danish Informative Inventory Report 2023* (Danish Centre for Environment and Energy, 2025).

³⁷ Pers. Kommunikation University Aarhus, Postdoc M. Toda, 27.6.2025.

Breitverteilern und seit 2011 muss die Gülle auf Gras- und Ackerland direkt in den Boden injiziert werden³⁸.

³⁹ Die Ansäuerung von Gülle mit Schwefelsäure vor dem Ausbringen oder bereits bei der Lagerung im Stall ist ebenfalls eine häufig anzutreffende Technik in Dänemark und wird bei rund 20 % der ausgebrachten Gülle angewandt. ⁴⁰ Seit 2005 trägt die Pflicht die Misthaufen innert 24 h abzudecken, zu den Emissionsreduktionen bei.

In Dänemark stiessen die anfänglichen Regulationen zur Vermeidung des Stickstoffüberschusses auf offene Ohren bei den Landwirtschaftsbetrieben und wurden breit unterstützt und zu einem grossen Teil sogar freiwillig umgesetzt. Dies war hauptsächlich darin begründet, dass die Regulationen einen finanziellen Vorteil brachte. So wurde grosser Wert darauf gelegt, den Stickstoffgehalt – und somit den Marktwert – von Gülle zu erhöhen, indem die Verluste (im Stall, bei der Ausbringung, etc.) reduziert wurden. ⁴¹ Einerseits verbleibt dem Landwirt somit mehr Stickstoff im Hofdünger und es fallen weniger Kosten für zusätzlichen Kunstdünger an, andererseits wird die Effizienz des Stickstoffverbrauchs erhöht und weniger davon gelangt in die Umwelt, wo es zu schädlichen Auswirkungen kommt. Langfristig profitiert Dänemark von seiner frühen Pionierrolle in Sachen Stickstoffeffizienz, da das technische Know-how zur Gülleausbringung und -ansäuerung zwischenzeitlich in andere EU-Staaten (inklusive der Schweiz) exportiert werden konnte.

In den letzten Jahren jedoch stiessen auch in Dänemark die Regulationen des Staates auf Widerstand in der Branche, da die Umsetzbarkeit der neuen Massnahmen zunehmend kostspielig ist und sich die Wirtschaftlichkeit für die Betriebe nicht mehr erhöht. Somit lässt sich in Dänemark zusammenfassen, dass die low-hanging fruits (sprich: die leicht umsetzbaren Massnahmen) bezüglich Emissionsminderung geerntet wurden und die Massnahmen für weitere Emissionsreduktionen teurer, schwieriger und tendenziell technologieintensiver werden.

2. Methodik

In allen Messnetzen sind jeweils an jedem Messpunkt zwei oder drei Passivsammlerröhrchen in einem Wetterschutzgehäuse montiert (Abbildung 6).

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 gut übereinstimmen. ⁴²

³⁸ Mittels Gülle-Injektionsverfahren, auch bekannt als «Gülledrill» in der Schweiz

³⁹ Aarhus University, *Danish Emission Inventories for Agriculture*, 443 (Danish Centre for Environment and Energy, 2021), <https://dce2.au.dk/pub/SR443.pdf>.

⁴⁰ Danish Agricultural Agency, „Acidification“, 2022, <https://en.lbst.dk/agriculture/acidification>.

⁴¹ Eory, V. und Huthchings, N.J., *A case study of agricultural nitrogen management policy in Denmark* (Scotland's Rural College & Aarhus University, 2017), https://www.climatexchange.org.uk/wp-content/uploads/2023/09/eu_case_studies_denmark_-_agricultural_nitrogen_management.pdf.

⁴² Seitler, E. u. a., *Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2024*.

Pro Messpunkt wird jeweils doppelt (heute) bis dreifach (frühere Messungen) gemessen, um die Messunsicherheit zu verringern.⁴³ 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 am Boden vorgefundene Passivsammlerröhrchen). 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 (entspricht 85 %).



Abbildung 6: Ein Ferm-Passivsammler im Einsatz.⁴⁴ Pro Messpunkt werden immer mindestens zwei Messungen durchgeführt und gemittelt, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

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.⁴⁵ In den Folgejahren wurden gemeinsame Ammoniak-Messberichte für die Zentralschweiz verfasst.^{46 47 48 49 50 51 52 53 54 55}

Im vorliegenden Bericht werden im Auftrag von Umwelt Zentralschweiz (UZ, vorgängig ZENTRUM bzw. ZUDK) die Ammoniak-Messdaten der gesamten Zentralschweiz bis Ende 2024 im Rahmen des Basisleistungsauftrags (BLA) in-luft ausgewertet. Seit 2023 wird der Bericht über die Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz im Zweijahres-Rhythmus publiziert.

⁴³ Dämmgen, U. u. a., *Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig*, Landbauforschung, Sonderheft 337 (2010).

⁴⁴ Fotos von E. Seidler, FUB

⁴⁵ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen Kanton Luzern 2000 bis 2011* (inNET Monitoring AG, 2012).

⁴⁶ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2012* (inNET Monitoring AG, 2013).

⁴⁷ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2013* (inNET Monitoring AG, 2014).

⁴⁸ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2015* (inNET Monitoring AG, 2016).

⁴⁹ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2016* (inNET Monitoring AG, 2017).

⁵⁰ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2017* (inNET Monitoring AG, 2018).

⁵¹ Wey, H. u. a., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2018* (inNET Monitoring AG, 2019).

⁵² Wey, H. u. a., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2019* (inNET Monitoring AG, 2020).

⁵³ Wey, H. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2020* (inNET Monitoring AG, 2021).

⁵⁴ Wey, H. und Ruckstuhl, Ch., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2021* (inNET Monitoring AG, 2022).

⁵⁵ Wey, H. u. a., *Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2022* (inNET Monitoring AG, 2023).

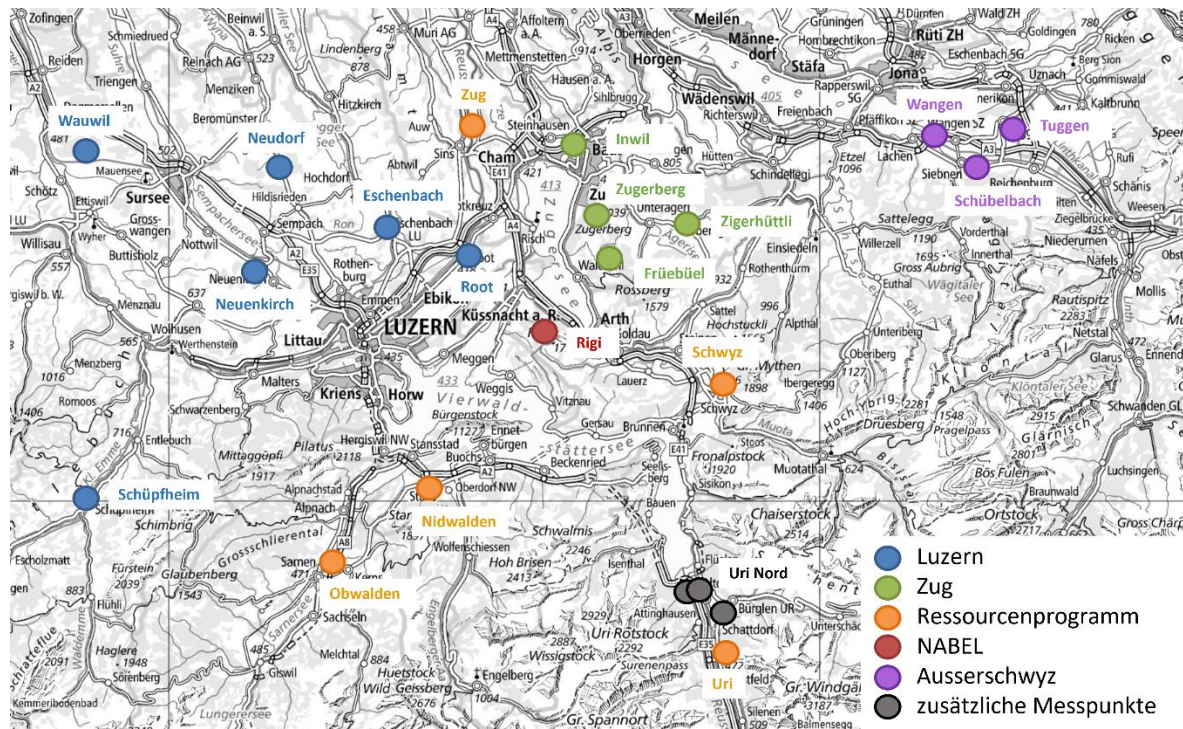


Abbildung 7: Gesamtübersicht der Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz: Die Punkte stehen entweder für Messgebiete, in welchen in der Regel mehrere Messpunkte vorhanden sind, oder für einzelne Messpunkte.

Im Kanton Luzern sind insgesamt sechs Messgebiete vorhanden. In jedem Messgebiet gibt es mehrere Messpunkte (Abbildung 7). 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 Kantonszugehörigkeit 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 7). 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 ESC14.⁵⁶

2.2. Messperioden aller Messpunkte

Abbildung 8 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, Neuenkirch, 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 8 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.

⁵⁶ Seitler, E. u. a., *Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2024*.

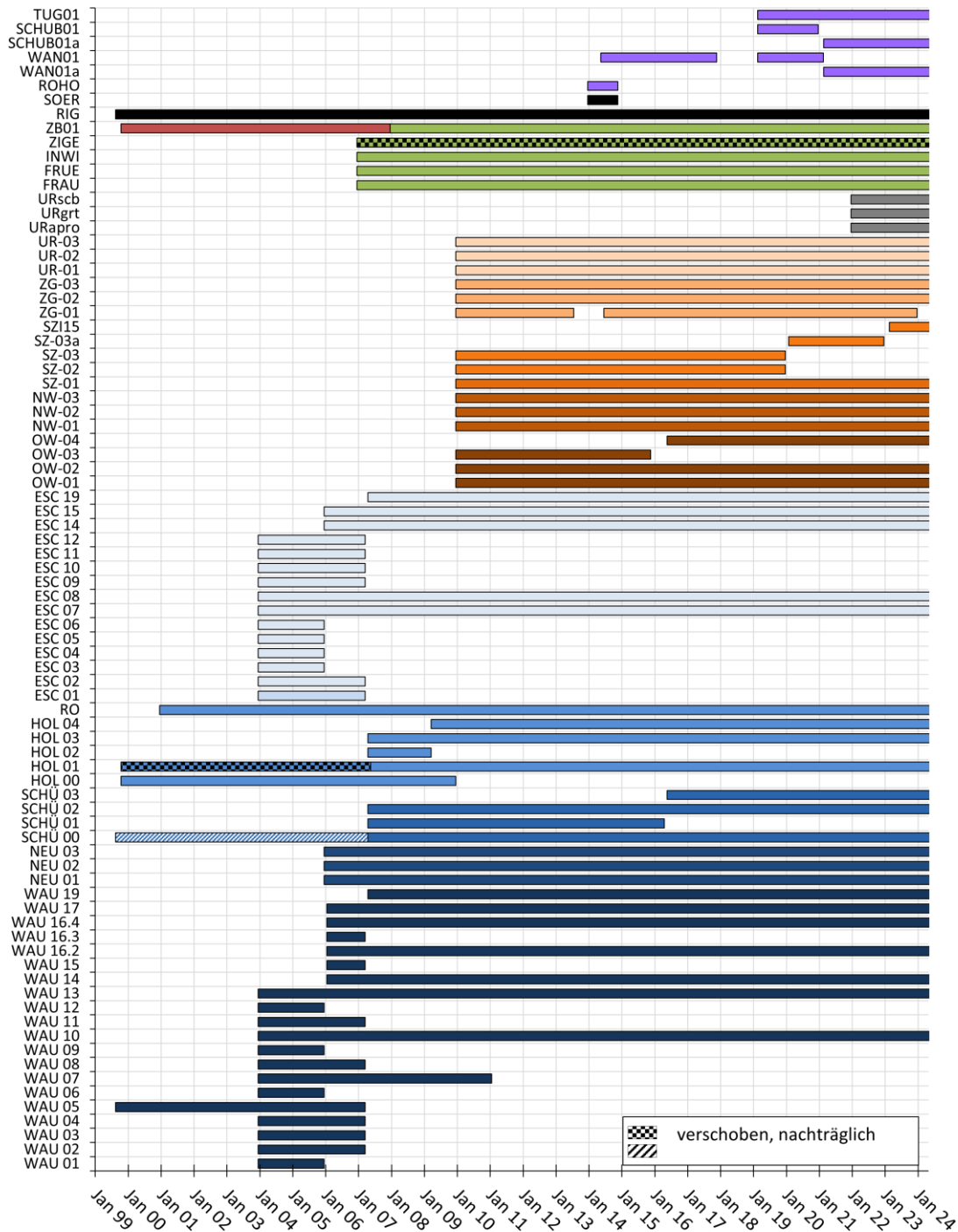


Abbildung 8: Zeitliche Übersichtsgrafik aller Messpunkte in der Zentralschweiz, farblich unterteilt in die verschiedenen Messgebieten.⁵⁷

⁵⁷ Die Umrechnung für die HOL01-Werte vor 2007 wurde durch eine Parallelmessung mit HOL00 ermittelt: $HOL01 = HOL00 \cdot 0.98 + 0.90$ ($R^2=0.95$). Die Umrechnung für die ZB01-Werte vor 2008 wurde durch eine Parallelmessung mit ZB00 ermittelt: $ZB01 = ZB00 \cdot 1.05$ ($R^2 = 0.97$)

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 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 der Vandalismus 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. Ab 2023 wurde der Messpunkt SZ03a mit dem Messpunkt SZ115 ersetzt, dies aufgrund von Bauarbeiten am Standort des alten Messpunktes.

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.

⁵⁸ Seitler, E. u. a., *Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz, Beschreibung der Standorte und Daten*. (FUB - Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, 2013).

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.

2.3. Qualitätsprobleme im Jahr 2023

Aufgrund von technischen Qualitätsproblemen im Analyselabor kam es im Jahr 2023 zu aussergewöhnlich vielen Messausfällen. Probleme mit einer defekten Lüftung im Labor führten zu vermehrten Messausfällen im Februar und März 2023. Ab Mitte Jahr 2023 kam es erneut zu Messausfällen, diesmal war eine Änderung des Kunststoffgranulates der Passivsammler verantwortlich für die Ausfälle. Aufgrund von Lieferengpässen musste der Hersteller auf ein anderes Kunststoffgranulat zurückgreifen, welches bei Wärmeeinfluss Ammoniak ausgast.⁵⁹ Durch die Qualitätsprobleme konnte die geforderte Datenverfügbarkeit von 85 % für viele Jahresmittelwerte nicht erreicht werden. Im Jahr 2023 konnte daher nur an 23 von 46 Messpunkten ein Jahresmittelwert ermittelt werden. In der folgenden Tabelle 1 wird aufgeführt, welche Messpunkte 2023 unter die geforderte Datenverfügbarkeit von 85 % fielen und für welche daher kein Jahresmittelwert berechnet werden konnte.

Tabelle 1: Standorte mit ungenügender Datenverfügbarkeit im Jahr 2023. Die Datenverfügbarkeit fällt tiefer aus als in den Vorjahren aufgrund von Qualitätsproblemen.

Messpunkt		Zeitabdeckung in %
HOL01	Neuenkirch 1	84.9
HOL02	Neuenkirch 2	84.9
HOL03	Neuenkirch 3	84.9
RO	Root Michaelskreuz	84.7
SCHÜ00	Schüpfheim 0	84.9
SCHÜ02	Schüpfheim 2	84.9
SCHÜ03	Schüpfheim 3	84.9
WAU10	Wauwil 10	61.8
SCHUB01a	Schübelbach	76.7
SZ-01	Bauschli	84.9
SZI15	Betti	84.6
TUG01	Tuggen	84.7
WAN01a	Wangen	84.9
APR	A Pro	84.7
GRT	Gartenmatt	84.7
SCB	Schattdorf-Bürglen	84.7

⁵⁹ Seitler, E. u. a., Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2024.

URI 03	Uri 3	84.6
FRAU	Kloster Frauental	84.6
FRÜE	Früebüel	84.7
INWI	Inwil	76.9
ZG-01	Niederwil 1	84.6
ZG-03	Niederwil 3	77.0
ZIGE	Zigerhüttli	84.6

2.4. 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 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.

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

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

- «Lokale» Ammoniakemissionen, d. h. Quellen im Abstand von 0 bis 1 km zu den untersuchten Ökosystemstandorten, tragen im gesamt-schweizerischen Mittel knapp einen 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.

3. Resultate

3.1. Meteorologie 2023 und 2024

Die Jahre 2023 und 2024 waren landesweit sehr mild. Die Jahresmitteltemperatur lag in beiden Jahren +1.4 °C über der Referenzperiode 1991–2020. Die Jahresverläufe beider Jahre waren geprägt durch milde Winter, einen niederschlagsreichen Frühling und Sommerhitze, die sich mit Unwettern und Starkniederschlägen abwechselte (Abbildung 9).

Der Sommer 2023 brachte zwei Hitzewellen, eine erste im Juli und eine weitere Mitte August. Die Hitzewelle im August war von ungewöhnlicher Dauer, sowie Intensität und endete mit heftigen Unwettern und Starkniederschlägen. Der Herbst war der zweitwärmste seit Messbeginn 1864. Die durchschnittliche Herbsttemperatur lag landesweit +2.2 °C über dem klimatologischen Mittel der Referenzperiode 1991–2020.⁶²

⁶² MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2023 (2024).

Das Jahr 2024 zeigte den mildesten Winter seit Messbeginn 1864. Die durchschnittliche Wintertemperatur 2023/24 lag schweizweit +2.8 °C über der Referenzperiode 1991–2020. Der Frühling war geprägt durch überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Der Sommer brachte den zweitwärmsten August seit Messbeginn und brachte mehrere schwere Unwetter mit sich. Die landesweite durchschnittliche Temperatur lag im Herbst +0.9 °C über der Referenzperiode 1991–2020. Zwei Temperaturstürze im September, sowie November führten zu aussergewöhnlich grossen Schneemengen bis in tiefe Lagen.⁶³

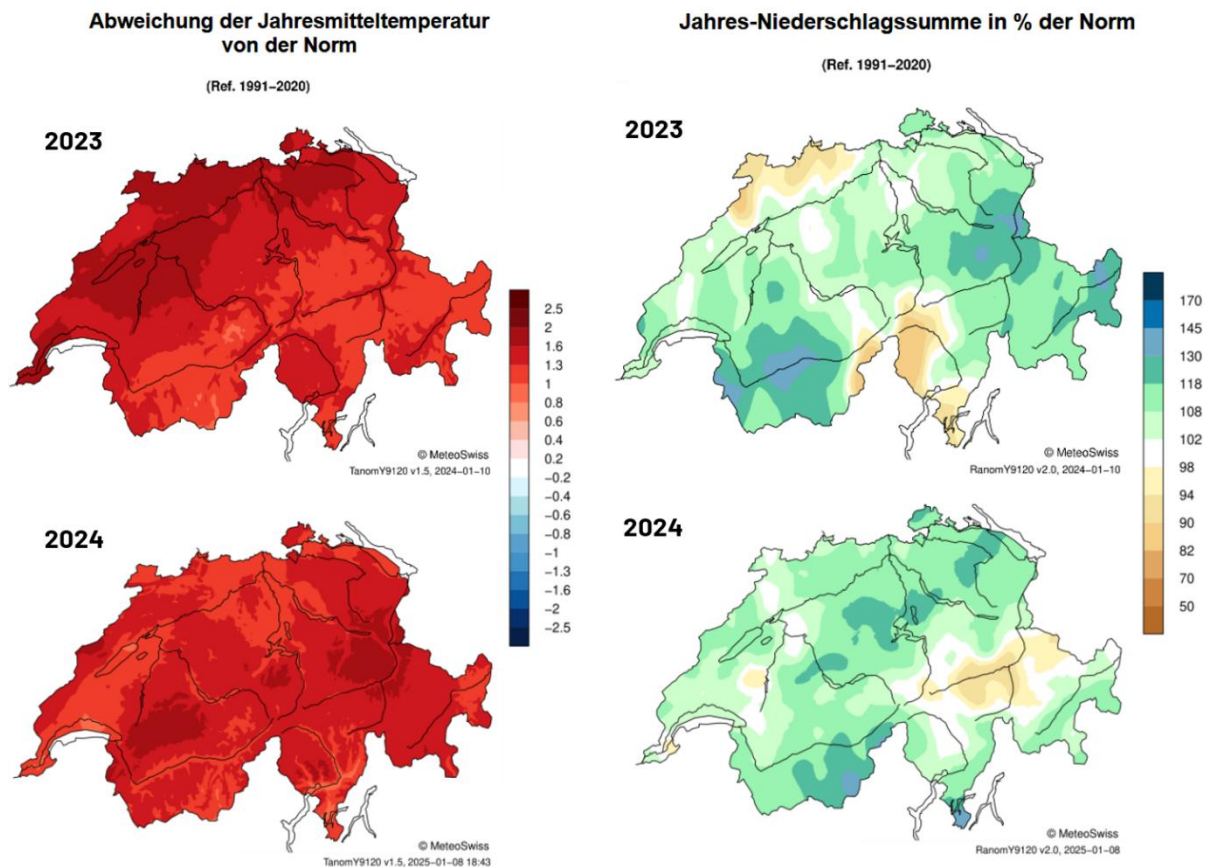


Abbildung 9: Links: Abweichung der Jahresmitteltemperatur 2023 (oben) und 2024 (unten) von der Referenzperiode (1991–2020) in °C. Rechts: Jahres-Niederschlagssumme in Prozent der Referenzperiode von 2023 (oben) und 2024 (unten) (1991–2020).^{63 64}

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 10). 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 (2020 – 2024). Daher sind die Abbildungen nicht mehr direkt mit vorherigen

⁶³ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2024 (2025).

⁶⁴ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2023 (2024).

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 10), aber auch Nidwalden, Wauwil, Zug, Eschenbach, Neudorf und Schüpfheim, zeigen einen ersten Höchstwert im März. Diese Spitze ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass es eine gewisse Synchronisation beim Ausbringen von Gülle gibt. In den ersten warmen Tagen zu Beginn der Vegetationsperiode 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 die Sommertemperaturen in den letzten fünf Jahren hoch, was bei gleichbleibendem Güllemaangement 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 erneut an.

Bei einigen Messpunkten sind, wenn auch in geringerem 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 dem Wintereinbruch 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 10).

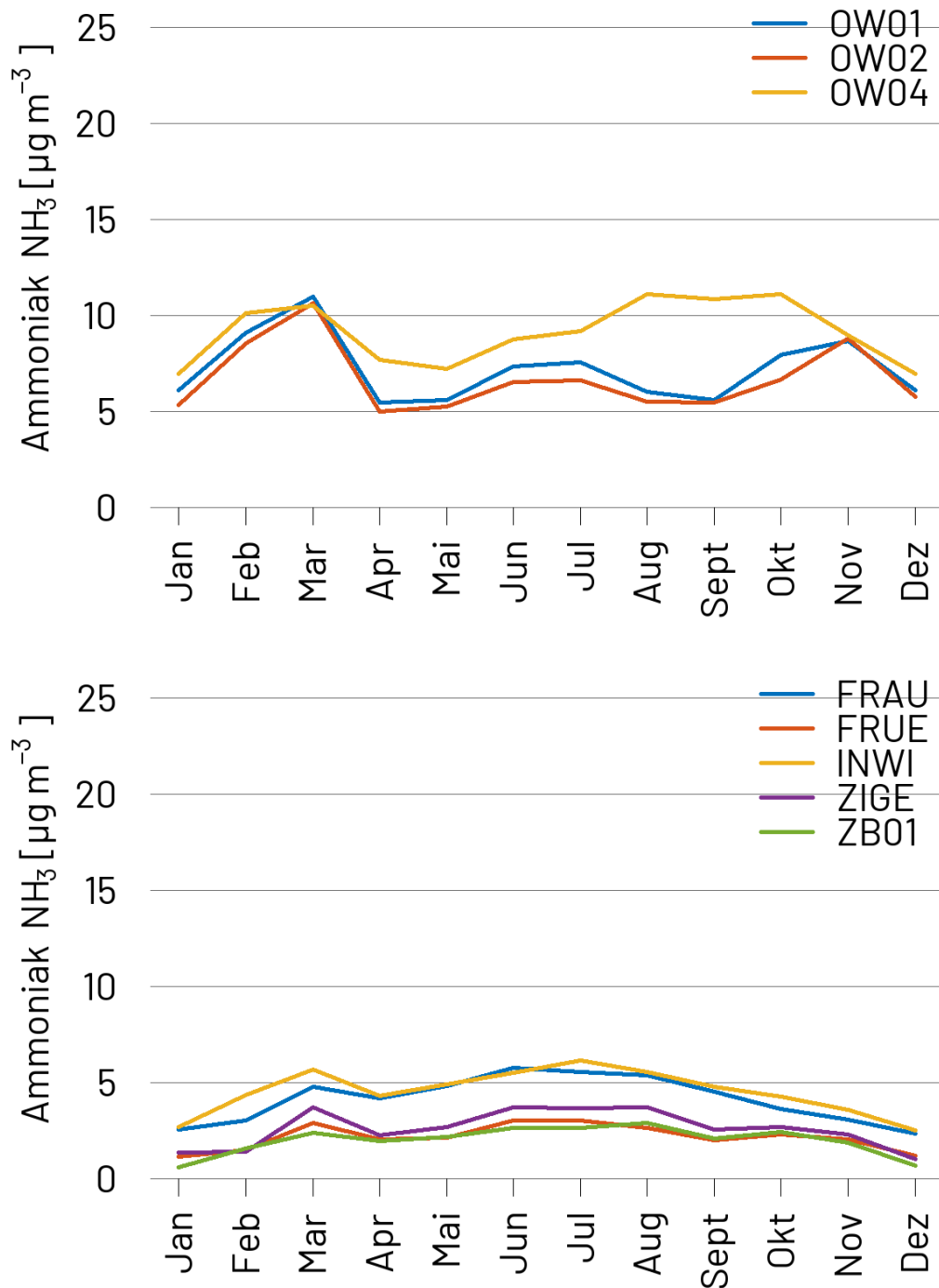


Abbildung 10: Vergleich des Jahresgangs unterschiedlicher Messpunkte mit unterschiedlicher Bewirtschaftung bzw. unterschiedlich intensiver Tierhaltung. Mittelung der letzten fünf Jahre (2020–2024). Oben: Messpunkte Kanton Obwalden. Unten: Messpunkte Kanton Zug.

3.2.2. Mehrjahresmittelwerte

Tabelle 2 und Abbildung 11 zeigen die mehrjährigen Jahresmittel inkl. Standardabweichung der Ammoniakkonzentration der verschiedenen Messgebiete. Zusätzlich zum Mittelwert seit Messbeginn wird seit dem Bericht 2021 in Tabelle 2 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 $3 \mu\text{g m}^{-3}$ (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 2: 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)	7.9 ± 0.7	7.5 ± 0.6
Eschenbach (ESC07, ESC08, ESC14, ESC15, ESC19)	9.4 ± 1.4	9.4 ± 1.0
Neuenkirch (HOL01, HOL03, HOL04) ⁶⁵	7.9 ± 1.2	8.4 ± 0.6
Schüpfheim (SCHÜ00, SCHÜ02, SCHÜ03) ⁶⁶	7.5 ± 1.4	6.5 ± 0.5
Root, Michaelskreuz (RO)	3.2 ± 0.5	3.1 ± 0.3
Neudorf (NEU01, NEU02, NEU03)	5.8 ± 0.8	5.8 ± 0.4
Nidwalden (NW01, NW02, NW03)	6.6 ± 0.7	6.3 ± 0.7
Obwalden (OW01, OW02, (OW03), OW04) ⁶⁷	7.1 ± 1.1	7.7 ± 1.1
Innerschwyz (SZ01, (SZ02, SZ03, SZ03a), SZI15) ⁶⁸	4.9 ± 0.9	4.5 ± 0.5
Ausserschwyz (WAN01, WAN01a, SCHUB01, SCHUB01a, TUG01) ⁶⁹	8.3 ± 1.4	7.9 ± 1.8

⁶⁵ Der Messpunkt HOL04 wurde in früheren Berichten ausgenommen, ist seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

⁶⁶ Ab 2016 war beim Messgebiet Schüpfheim ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (SCHÜ01), da dieser Messpunkt aufgehoben wurde.

⁶⁷ 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.

⁶⁸ Ab 2023 wurde die mittlere Konzentration des Messgebiets Innerschwyz aus SZ01 und neu SZI15 gebildet, weil die Messpunkte SZ-02, SZ-03 und SZ-03a aufgegeben wurden.

⁶⁹ 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, 2022 sowie 2024 (je 3 Messpunkte) gemacht.

Uri (UR01, UR02, UR03)	6.4 ± 0.6	6.5 ± 0.6
Uri Nord (UR-GRT, UR-SCB, UR-APRO) ⁷⁰	4.6	4.6
Zug (ZG01, ZG02, ZG03) ⁷¹	8.2 ± 1.5	7.5 ± 1.6
Kloster Frauental (FRAU)	4.1 ± 0.5	4.1 ± 0.4
Frübüel (FRÜE)	1.9 ± 0.4	2.2 ± 0.4
Inwil (INWI)	4.3 ± 0.5	4.4 ± 0.3
Zigerhüttli (ZIGE)	2.4 ± 0.4	2.5 ± 0.4
Zugerberg 1 (ZB01)	1.9 ± 0.3	2.0 ± 0.3
Rigi-Seebodenalp (RIGI)	1.6 ± 0.3	1.7 ± 0.3

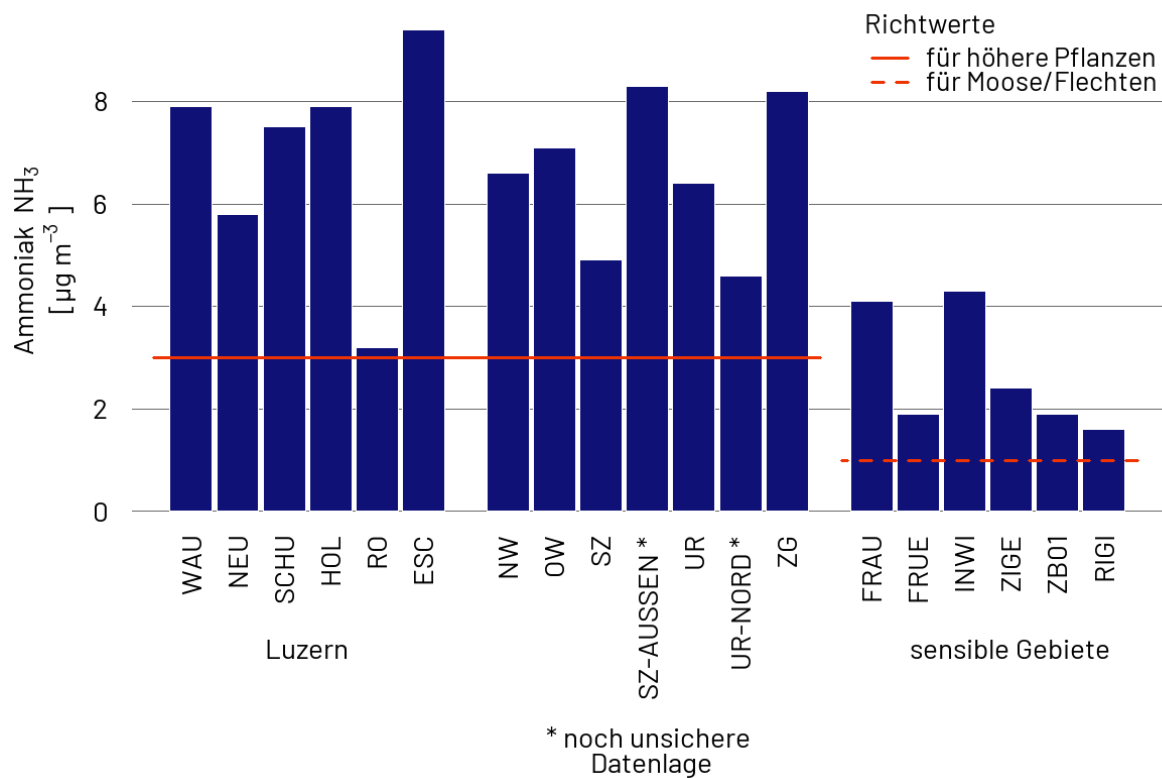


Abbildung 11: Mehrjähriges Mittel (2010–2024) der Ammoniakkonzentration in den einzelnen Messgebieten. Die rote ausgezogene Linie kennzeichnet den Critical Level (CL) für höhere Pflanzen, die rote gestrichelte Linie denjenigen für empfindliche Moose und Flechten.

⁷⁰ Im Messgebiet Uri Nord ist die Datenlage für eine zuverlässige Berechnung momentan noch ungenügend. Die Messungen starteten 2022.

⁷¹ Der Messpunkt ZG01 wurde in früheren Berichten ausgenommen, ist seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

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 12). 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 allen drei Messpunkten in allen Jahren überschritten.

Im Jahr 2024 wurden an fast allen Zuger Messpunkten tiefere Ammoniakkonzentrationen als in den Vorjahren 2020–2022 gemessen. Dies ist wahrscheinlich witterungsbedingt, da die Jahre 2020 und 2022 von langen, trockenen Sommer mit Hitzewellen geprägt waren, während 2024 niederschlagsreicher war (Kapitel 1.1). Bei INWI und ZIGE lagen die Ammoniakkonzentrationen von 2024 auf ähnlichem Niveau wie im Jahr 2021. Auch dies deutet auf den Einfluss der Witterungsbedingungen hin, da sich das Jahr 2021 eher kühl und nass zeigte. Bei ZG01 und ZG02 wurden 2024 die tiefsten Messwerte seit Messbeginn registriert.

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 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.

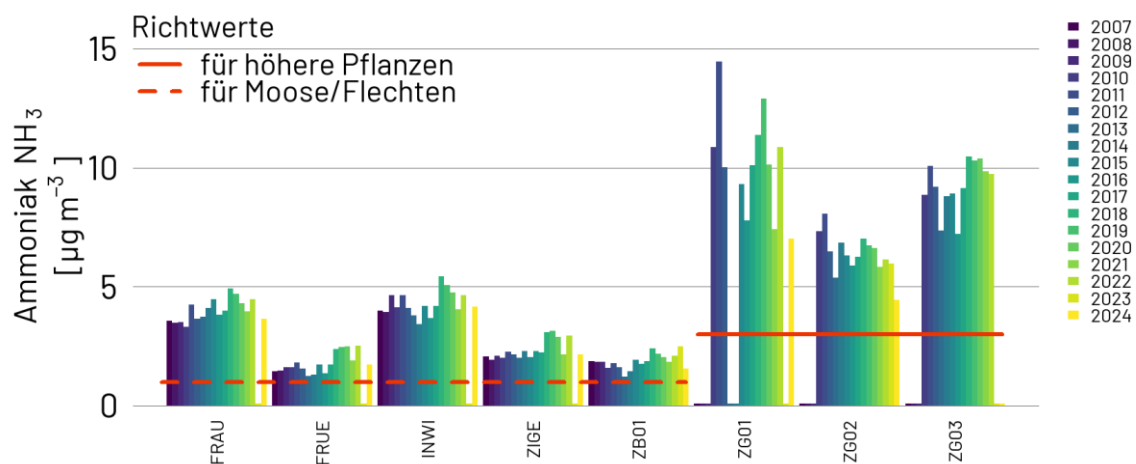


Abbildung 12: Jahresmittel (2007 bis 2024) der Ammoniakkonzentration an den einzelnen Messpunkten im Kanton Zug. Dies beinhaltet sowohl die kantonalen Messpunkte (FRÜE, ZB01, ZIGE, FRAU, INWI), wie auch diejenigen des Ressourcenprojekts (ZG01, ZG02, ZG03). Für ZG01 konnten aufgrund von Datenlücken keine gültigen Jahresmittel für 2013 und 2014 berechnet werden. Für ZG03 konnten aufgrund von Datenlücken keine gültigen Jahresmittel für 2023 und 2024 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 13 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 2 ein.⁷² 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 Jahr 2023 können aufgrund von Datenlücken nur die Peaks von Nid- und Obwalden dargestellt werden. Diese bewegen sich auf ähnlichem Niveau wie in den Vorjahren, mit Ausnahme des besonders trockenen und warmen Jahres 2022. Im Jahr 2024 waren die Frühlingspeaks deutlich weniger stark ausgeprägt als in den Vorjahren. Der Frühling 2024 war zwar niederschlagsreich, aber dies kann die tieferen Peaks nicht vollständig erklären, da auch das Jahr 2021 einen kühlen und eher nassen Frühling verzeichnet.

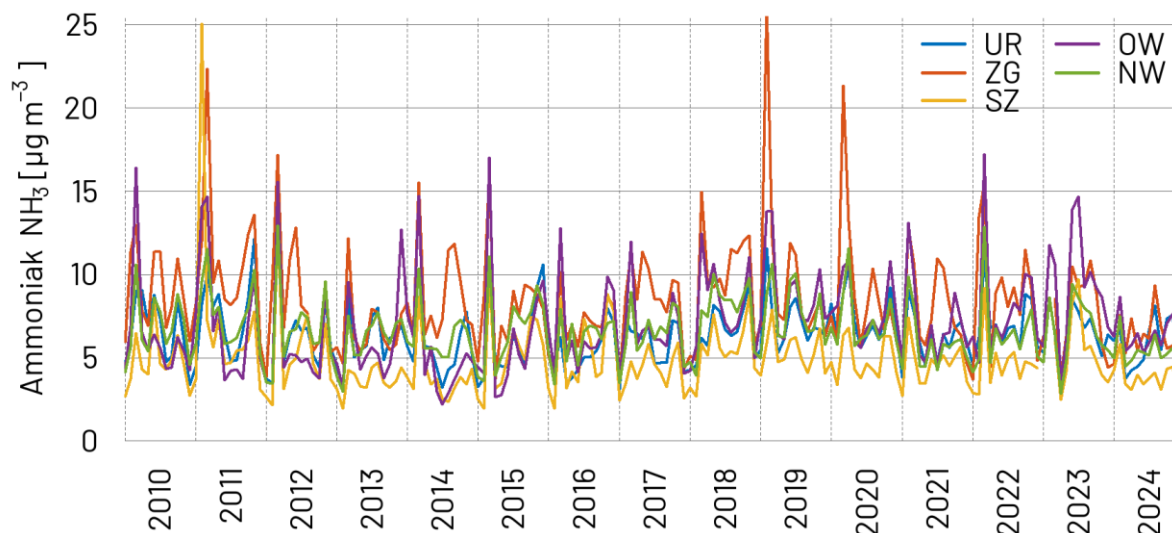


Abbildung 13: zeigt den Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 in den Messgebieten des Ressourcenprojekts der Zentralschweizer Kantone (ohne Messgebiete des Kantons Luzern). Die Messgebiete Ausserschwyz und Uri Nord sind nicht dargestellt. In die Mittelung flossen dieselben Messpunkte wie in Tabelle 2 ein.⁷³

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration im Kanton Zug seit 2010 ist in Abbildung 14 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 15 vergleichbar, jedoch auf teilweise deutlich höherem Niveau. All diese Standorte liegen in Landwirtschaftsgebieten. Die Frühlingspeaks 2019, 2020 und 2022 sind

⁷² Der Messpunkt ZG01 wurde in früheren Berichten aus unbekannten Gründen ausgelassen, seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

⁷³ Der Messpunkt ZG01 wurde in früheren Berichten aus unbekannten Gründen ausgelassen, seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

stark ausgeprägt. Der Frühlingspeak im Jahr 2024 ist deutlich weniger stark ausgeprägt. Der deutliche Herbstpeak ist auch in den Jahren 2023 und 2024 deutlich sichtbar.

- Mittlere Belastung: Die Messungen in Inwil (INWI) und Frauental (FRAU) weisen eine mittlere Ammoniakbelastung auf. Beide Standorte zeigen 2023 einen ausgeprägten Sommerpeak und im Jahr 2024 einen Herbstpeak.
- Tiefe Belastung: Die Messungen in Frübüel (FRUE), Zigerhüttli (ZIGE) und Zugerberg (ZB01) wurden bewusst in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen und Gegenden mit geringer Belastung durchgeführt. Im Jahr 2023 verzeichneten diese Standorte einen deutlichen Konzentrationsanstieg im Sommer.

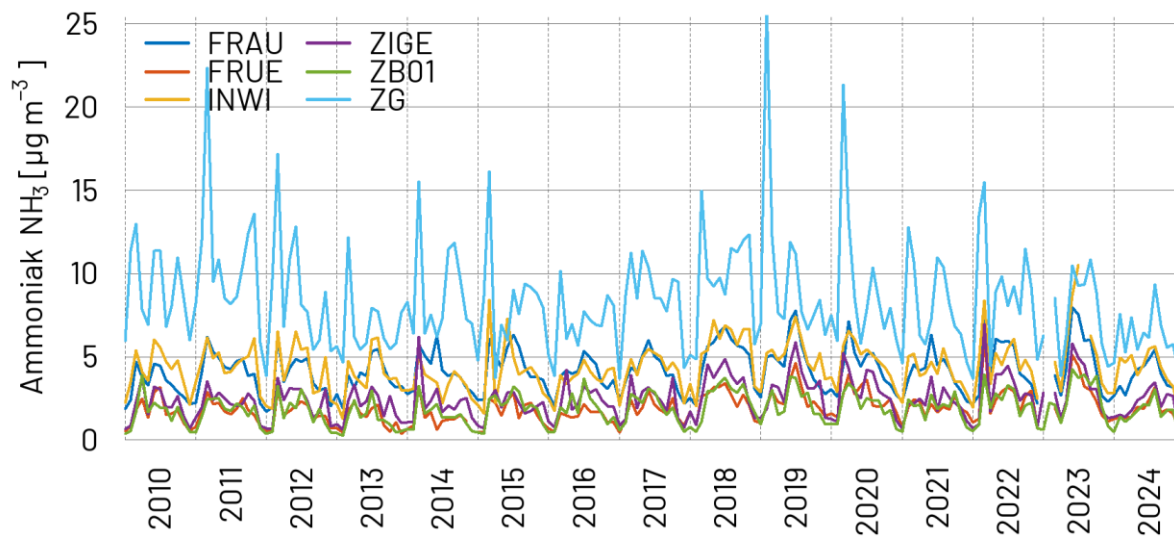


Abbildung 14: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den verschiedenen kantonalen Passivsammler-Standorten in Zug sowie den Zuger Ressourcenprojekt-Standorten (ZG).

Abbildung 15 zeigt schliesslich den Verlauf der Ammoniakkonzentrationen seit Januar 2010 für die Luzerner Messgebiete. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 2 eingeflossen.

Im Verlauf der Ammoniakkonzentration 2023 ist ein deutlicher Sommerpeak und teilweise ein weiterer Peak im Herbst (v. a. in ESC) zu erkennen. Im Jahr 2024 sind die Peaks und Konzentrationen deutlich niedriger. Mit Ausnahme von HOL, welches – wie schon in den Vorjahren – einen deutlichen Herbstpeak verzeichnet.

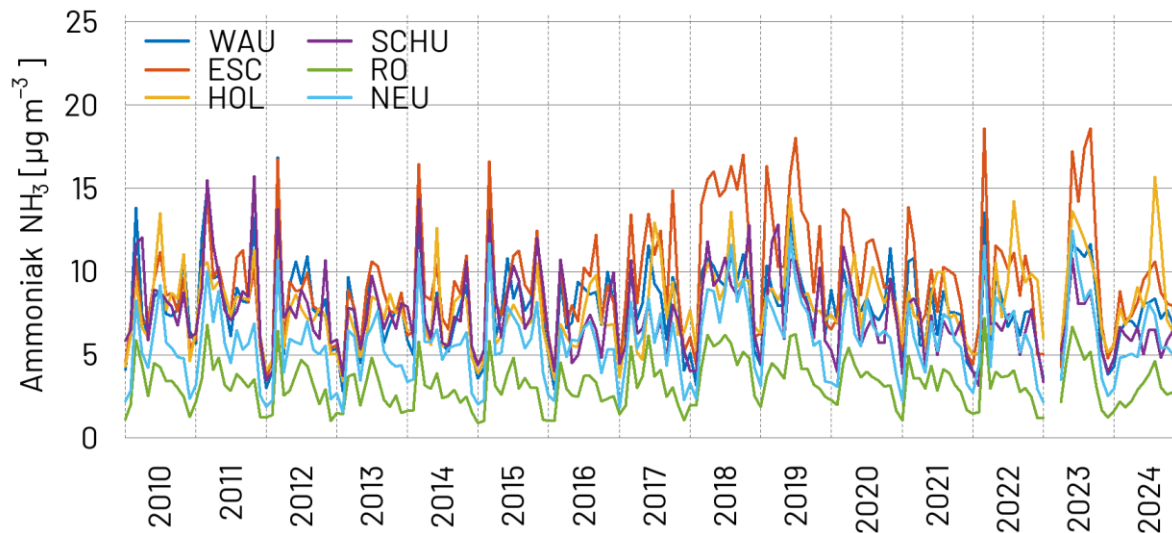


Abbildung 15: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010, gemittelt für jedes Messgebiet im Kanton Luzern.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen der Verläufe der Ammoniakkonzentrationen in den Jahren 2023 und 2024 festgehalten werden:

- Die Ammoniakkonzentrationen 2024 sind vergleichbar mit denjenigen im kühlen und nassen Jahr 2021,
- befinden sich aber stets noch auf hohem Gesamtniveau.
- Im Jahr 2023 konnten die Ammoniakkonzentrationen im Frühling wegen Datenlücken nur bedingt beurteilt werden. Im Jahr 2024 war der Frühlingspeak deutlich niedriger als in den Vorjahren. Der Sommer zeigte in beiden Jahren an vielen Standorten deutlich erhöhte Ammoniakkonzentrationen. Die Sommerpeaks zeigten im Jahr 2023 höhere Konzentrationen als im Jahr 2024. Je nach Standort waren die Peaks auch im Herbst wieder sichtbar.
- Die Sommerpeaks waren in den Jahren 2023 und 2024 deutlich sichtbar, sowohl bei Messpunkten in stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten als auch an Standorten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen.

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 2) und der Messpunkt Zugerberg. Um einen Eindruck der Variabilität zu bekommen, werden jeweils die Jahre 2018, 2020, 2021, 2022, 2023 und 2024 dargestellt (Abbildung 16). Diese Jahre zeigten unterschiedliche Witterungsverhältnisse:

- **2018** Zehn von Zwölf Monatstemperaturen lagen deutlich über der Referenzperiode, sechs davon im extremen Bereich. Die Rekordwärme wurde von einer monatelangen Regenarmut begleitet. ⁷⁴
- **2020** Rekordjahr ähnlich wie 2018, mit dem drittwärmsten Frühling seit Messbeginn und einer anhaltenden Trockenperiode. ⁷⁵
- **2021** Ein niederschlagsreicher Frühling und Sommer mit aussergewöhnlich kalten Frühlingstemperaturen. ⁷⁶
- **2022** Das bisher wärmste und regional sonnigste Jahr seit Messbeginn. Das Jahr war geprägt durch überdurchschnittliche Temperaturen, anhaltenden Niederschlagsmangel und viel Sonnenschein. ⁷⁷
- **2023** Das Jahr brachte eine Rekordnässe im Frühling. Der Sommer war durch zwei Hitzewellen und Starkniederschlagsereignissen geprägt. ⁷⁸
- **2024** Das Jahr war allgemein warm, der Frühling ausgesprochen niederschlagsreich. Auch dieser Sommer brachte Hitze und schwere Unwetter. ⁷⁹

Im Messgebiet Zug sind die von Jahr zu Jahr variierenden Ammoniakbelastungen deutlich erkennbar (Abbildung 16 links). Ein ausgeprägter erster Peak der Ammoniakkonzentration wird jeweils im Februar (z. B. 2021) bis April (z. B. 2018) gemessen, wobei im Jahr 2024 die Messwerte in allen drei Monaten niedrig sind. Danach verbleibt die Ammoniakkonzentration entweder auf hohem Niveau (wie z. B. 2018) oder, wie 2023, steigt nach einer zwischenzeitlichen Abnahme erneut an. Die Herbstpeaks sind in den Jahren 2023 (September) und 2024 (August) früher als im Vorjahr 2022 (Oktober). 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 16 (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.

⁷⁴ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2018 (2019).

⁷⁵ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2020 (2021).

⁷⁶ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2021 (2022).

⁷⁷ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2022 (2023).

⁷⁸ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2023.

⁷⁹ MeteoSchweiz, Klimabulletin Jahr 2024.

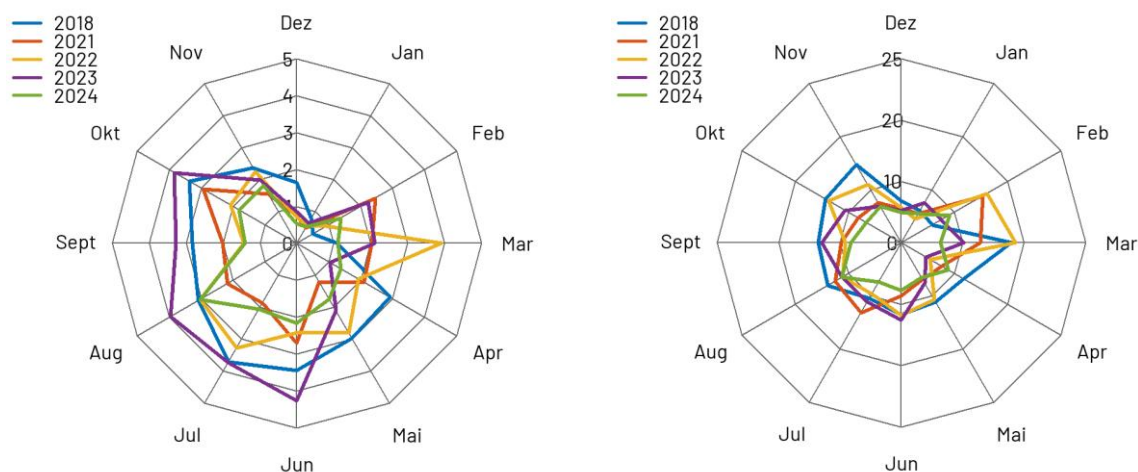


Abbildung 16: Darstellung der Monatsmittelwerte in Netzdiagrammen für den Messpunkt Zugerberg (links) und das Messgebiet Zug (rechts) für die Jahre 2018, 2020, 2021, 2022, 2023 und 2024. Die Radien der beiden Rosen entsprechen dabei nicht der gleichen Immission (5 bzw. 25 $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$).

3.3. Trendanalyse

3.3.1. Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

Für die folgenden Grafiken (Abbildungen 17 bis 20) wurden ab dem Jahr 2007 die Jahresmittelwerte der verschiedenen Messpunkte gemittelt. Dabei flossen nur Messpunkte mit ein, welche zwischen Messbeginn (2007 oder 2010) und 2024 höchstens drei Lücken in den Jahresmittelwerten aufweisen. Die verwendeten Messpunkte sind jeweils in der Bildlegende aufgeführt. Anschliessend wurden je drei lineare Trends für das jeweilige Messgebiet berechnet, und zwar für die ganze Messperiode (in blau, langfristig), für die letzten 10 Jahre (in rot, mittelfristig) und zusätzlich für die letzten fünf Jahre (in grau, kurzfristig).

Die Trends sind als Änderung in $\mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr angegeben. Anhand der 95-%-Vertrauensintervalle wird angegeben, ob das Resultat aus der Trendberechnung statistisch signifikant ist oder nicht. Die Vertrauensintervalle werden seit dem Bericht 2024 nicht mehr angegeben. 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.

- Das Messgebiet Wauwil zeigt über die langjährige Messperiode schwankende Ammoniakkonzentrationen mit einem neutralen, nicht-signifikanten langfristigen Trend (Abbildung 17). Nach einem Rückgang zwischen 2013 und 2014 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 Jahren davor und damit vergleichbar mit 2013/14. Nach einem kurzen Konzentrationsanstieg im Jahr 2023 fielen die Werte 2024 auf eine vergleichbare Konzentration mit dem Jahr 2007. Die tendenzielle Abnahme in den letzten zehn Jahren führte zu einem nicht-signifikanten

mittelfristigen Trend, während der kurzfristige Trend der letzten fünf Jahre einen signifikanten Rückgang der Ammoniakkonzentrationen von $0.32 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$ zeigt.

- Im Messgebiet Eschenbach (Abbildung 18) ist der langfristige Trend signifikant positiv, während die kurzfristigen Trends nicht-signifikant sind. Auch hier stiegen die Konzentrationen bis 2018 stark an und verblieben auf hohem Niveau bis 2020. Das Jahr 2023 zeigt deutlich höhere Ammoniakkonzentrationen als die drei Vorjahre. Im Jahr 2024 fielen die gemessenen Konzentrationen auf das Niveau von 2012–2013.
- Das Messgebiet Nidwalden deutet mit einem nicht-signifikanten negativen langfristigen Trend auf eine leichte Abnahme der Ammoniakkonzentration hin (Abbildung 19). Der Messwert 2023 ist ähnlich wie im Jahr 2022. Im Jahr 2024 wurde die bisher niedrigste Ammoniakkonzentration gemessen.
- Die im Messgebiet Uri gemessene Ammoniakkonzentration sank bis 2016 mit statistischer Signifikanz⁸⁰, stieg dann aber in den folgenden Jahren wieder an (Abbildung 20). Es resultiert ein neutraler, aber nicht-signifikanter langfristiger Trend. Seit 2022 nehmen die Ammoniakkonzentrationen leicht ab und es ergibt sich ein nicht-signifikanter negativer kurzfristiger Trend.

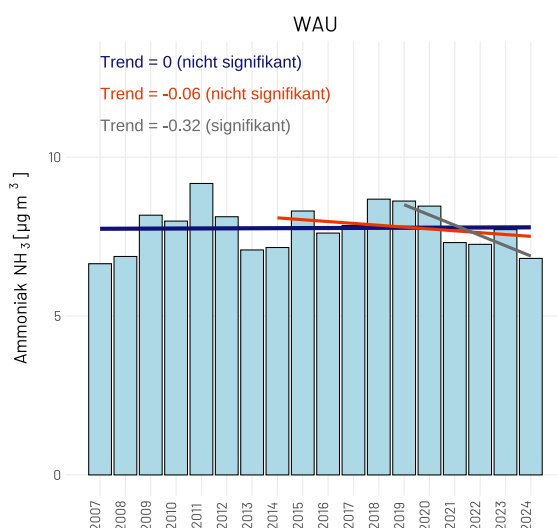


Abbildung 17: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Wauwil seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17 und WAU19 (ohne WAU16.2). Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

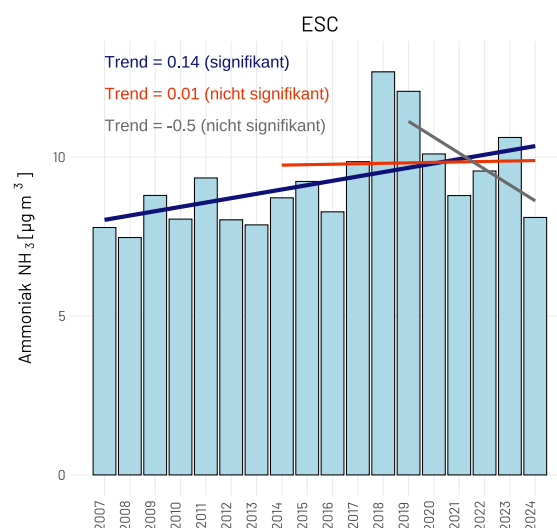


Abbildung 18: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Eschenbach seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind ESC07, ESC8, ESC14, ESC15 und ESC19. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

⁸⁰ Bieri, S. und Ruckstuhl, Ch., Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz 2000 bis 2016.

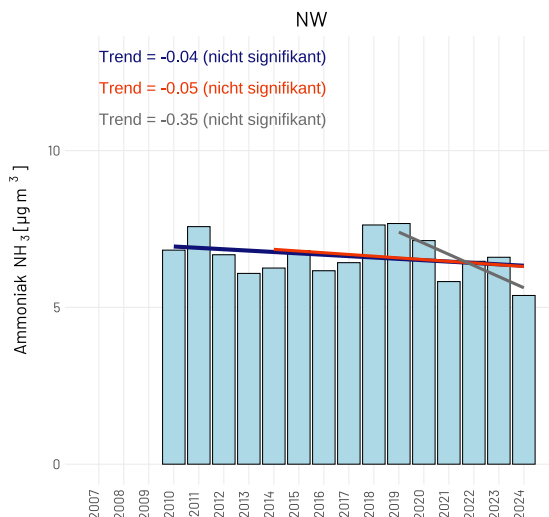


Abbildung 19: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Nidwalden seit Messbeginn 2010. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind NW01, NW02 und NW03. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

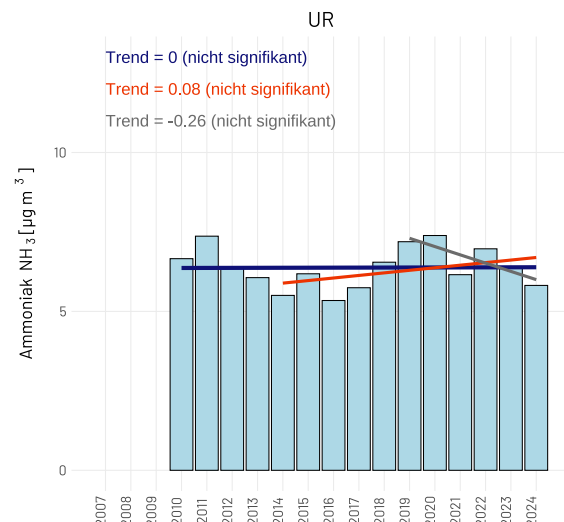


Abbildung 20: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Uri seit Messbeginn 2010. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind UR01, UR02 und UR03. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

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 (blaue Linie). Zusätzlich ist ein mittelfristiger, sprich zehnjähriger (rote Linie) und ein kurzfristiger, fünfjähriger Trend (graue Linie) angegeben.

In diesem Unterkapitel werden die Berechnungen der Jahresmitteltrends an vier ausgewählten Messpunkten aufgezeigt (Abbildungen 21 bis 24). 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 ⁸¹
- UR02: Futterbau
- ZB01: Futterbau; repräsentiert einen wenig belasteten Standort

⁸¹ Bis zum Bericht 2022 wurde hier der Messpunkt ESC14 gezeigt. Dieser zeigt aber für das Messgebiet aussergewöhnlich hohe Messwerte und ist daher nicht repräsentativ.

- SCHU00: Seit Messbeginn (2000) zeigt sich ein neutraler, nicht-signifikanter Verlauf der Ammoniakkonzentration (Abbildung 21). 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. Der kurzfristige Trend zeigt eine signifikante Abnahme der Ammoniakkonzentration. Da für das Jahr 2023 kein gültiger Jahresmittelwert erstellt werden konnte, ist die kurzfristige statistische Signifikanz noch mit Vorsicht zu interpretieren. Im Jahr 2024 wurden die zweitniedrigsten Ammoniakkonzentrationen seit Messbeginn gemessen.
- ESC08: Seit Messbeginn (2004) zeigt sich eine statistisch signifikante, zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.11 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr) (Abbildung 22). Die Werte aus den Jahren 2021 und 2022 sanken, nach sehr hohen Messwerten in den Jahren 2018 bis 2020, wieder auf ähnlichem Niveau wie vor 2018. Während 2023 deutlich höhere Ammoniakkonzentrationen zeigte, waren die gemessenen Werte von 2024 auf dem Niveau von 2021 und 2022.
- UR02: Der langjährige Trend seit 2010 zeigt eine leicht abnehmende Ammoniakkonzentration (Abbildung 23). Dieser ist aber nicht statistisch signifikant, da zwischen 2016 und 2020 stetig steigende Konzentrationen verzeichnet wurden. Seit 2022 ist aber eine Abnahme zu verzeichnen.
- ZB01: Der langfristige Trend ist tendenziell zunehmend ($+0.01 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr) (Abbildung 24). Die Konzentrationen sind insgesamt auf einem tieferen Niveau als bei den vorherig gezeigten Messpunkten. Auch hier sticht das Jahr 2024 mit deutlich niedrigeren Konzentrationen als in den Vorjahren hervor.

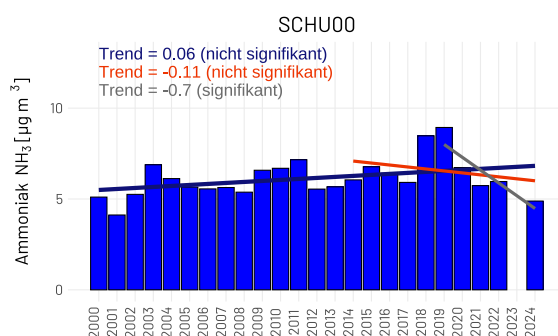


Abbildung 21: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt SCHU00. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

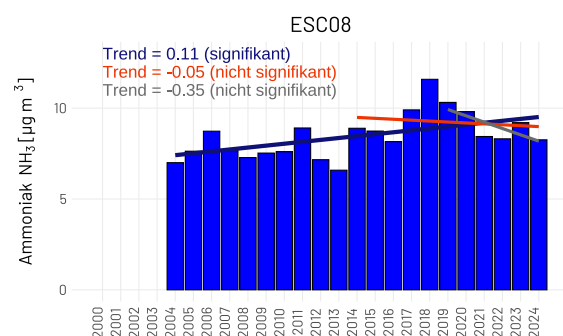


Abbildung 22: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ESC08. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

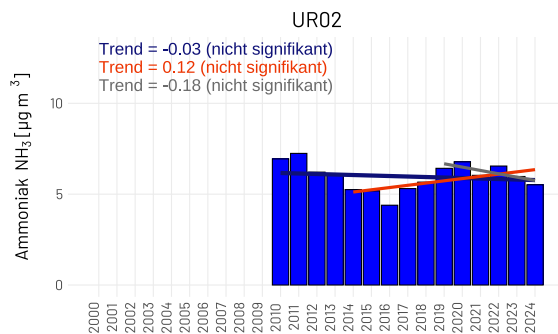


Abbildung 23: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt UR02. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

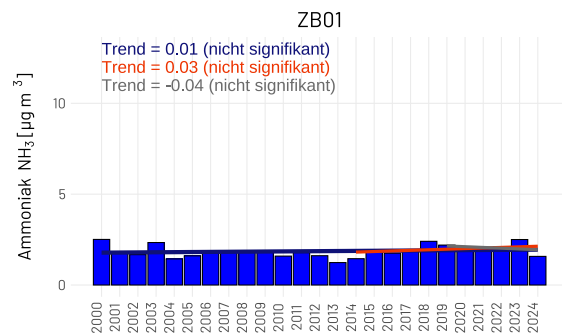


Abbildung 24: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ZB01. Der blaue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und graue Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz bewegten sich im Jahr 2024 auf ähnlichem Niveau wie die Werte des von Starkniederschlägen geprägten Jahr 2021 oder sogar darunter. Sie lagen somit tiefer als in den Hitzejahren 2018–2020 sowie 2022. Ob diese tieferen Ammoniakkonzentrationen auf das ab 2024 geltende Obligatorium zur emissionsarmen Gülleausbringung (z. B. mittels Schleppschlauchverfahren) zurückzuführen ist, lässt sich aufgrund der vorliegenden Daten noch nicht beurteilen. Das Jahr 2023 war an mehreren Messstandorten geprägt durch Messausfälle. Die vorhandenen Ammoniakkonzentrationen von 2023 bewegten sich aber auf dem Niveau des Vorjahres 2022. Der Frühlingspeak im Februar–März war im Jahr 2024 deutlich weniger stark ausgeprägt als in den Vorjahren. Jedoch war an den meisten Messpunkten ein deutlicher Herbstpeak sichtbar. Da die Messausfälle mehrheitlich im Frühling 2023 stattfanden, kann in diesem Jahr keine Aussage zu den Frühlingspeaks gemacht werden. An mehreren Messpunkten war im Jahr 2023 ein deutlicher Sommerpeak sichtbar.

Die **kurzfristigen Trends** (2019–2024) sind durch die Wetterextreme der letzten Jahre geprägt und in allen Messgebieten negativ, jedoch nur in Schwyz und Zug statistisch signifikant. Massgebend für die negativen Trends waren die hohen Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2020, welches durch Hitzewellen und Trockenheit geprägt war. Die Jahre 2021 und 2024 zeigten deutlich tiefere Ammoniakkonzentrationen, was höchstwahrscheinlich witterungsbedingt war, da beide Jahre einen nasskalten Frühling verzeichneten. Durch die kühlen und nassen Witterungsbedingungen gingen die Ammoniakverluste durch die Luft zurück und die gemessenen Konzentrationen waren somit tiefer. Dies heisst jedoch nicht, dass der Stickstoffverlust aus der Landwirtschaft insgesamt kleiner wurde. Um beurteilen zu können, ob der abnehmende Trend weiterhin anhält und über die Witterungsvariation hinausgeht, ist die Weiterführung des Messnetzes unabdingbar.

Im Gegensatz zu den kurzfristigen Trends zeigen die **langfristigen Trends seit Messbeginn leicht negative, neutrale oder leicht positive Entwicklungen** der Ammoniakimmissionen. Dies erstaunt angesichts

einer Emissionsreduktion aus landwirtschaftlichen Quellen von 17 % auf nationaler Ebene zwischen 1990 und 2020.⁸²

Ein Grund für die Abweichung zwischen reduzierten Ammoniakemissionen und Immissionen können die stark unterschiedlichen Witterungsbedingungen der vergangenen Jahre sein. Andererseits zeigt eine Studie, dass auch wenn die Ammoniakimmissionen um den Witterungseinfluss bereinigt werden, sich zwischen 2000 und 2021 an 17 von 32 untersuchten Schweizer Messpunkten signifikant zunehmende langfristige Trends beobachten lassen (Abbildung 25).⁸³

Eine weitere mögliche Erklärung für die Zunahme in witterungsbereinigten 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.

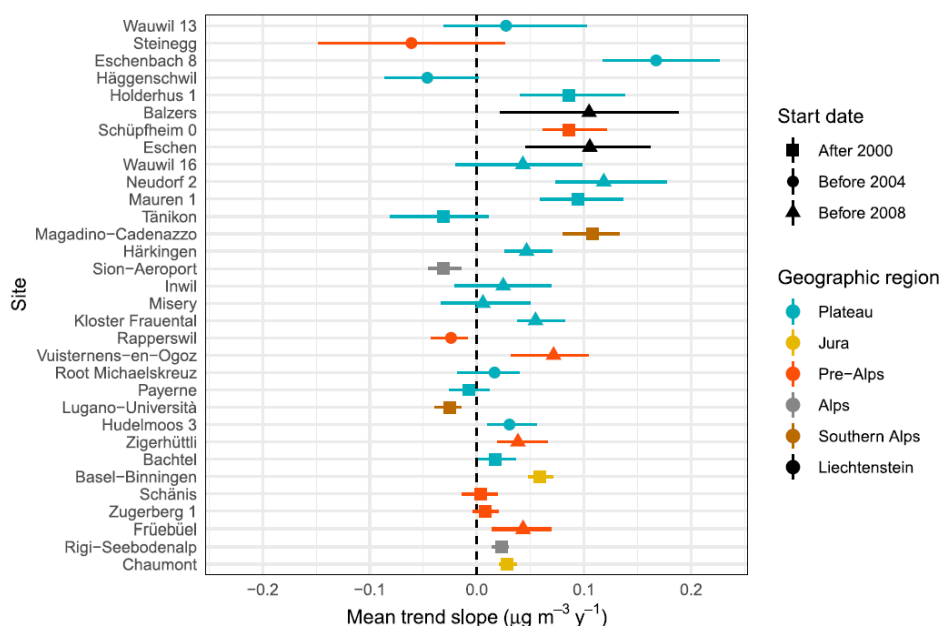


Abbildung 25: Mittlere witterungsbereinigte NH_3 -Trends zwischen 2000 und 2021 für 32 Messpunkte in der Schweiz und Liechtenstein. Die Standorte sind von oben nach unten nach abnehmender mittlerer NH_3 -Konzentration geordnet. Beinhaltet der Fehlerbalken die 0 nicht, so ist der Trend signifikant. Befindet sich ein Standort rechts der gestrichelten Linie, im positiven Bereich der *mean trend slope*, so handelt es sich um zunehmende Ammoniakkonzentrationen im Jahresmittel. Abbildung übernommen aus Grange et al. (2023).⁸⁴

⁸² Bass, A.-A. u. a., Switzerland's informative inventory report 2024 (IIR): Submission under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution.

⁸³ Grange, S.K. u. a., Meteorologically normalised long-term trends of atmospheric ammonia (NH_3) in Switzerland/Liechtenstein and the explanatory role of gas-aerosol partitioning.

⁸⁴ Grange, S.K. u. a., Meteorologically normalised long-term trends of atmospheric ammonia (NH_3) in Switzerland/Liechtenstein and the explanatory role of gas-aerosol partitioning.

Sowohl Witterungsschwankungen als auch die Feinstaubbildung können die langfristigen positiven Trends jedoch nur teilweise erklären. Bei den Messpunkten ESC08 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. Es ist daher weiterhin angebracht, emissionsmindernde Massnahmen zu fördern und bei Stallrenovierungen auf emissionsmindernde Massnahmen zu achten, wie dies beim Musterstall in Merlischachen SZ bereits umgesetzt wurde (Kapitel 1.1).^{85 86}

Um die Ziele der verschiedenen Massnahmenpläne und Ressourcenprojekte (Kapitel 1.4 und Abbildung 26) 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 miteinbeziehen. 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 recht 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.⁸⁷

⁸⁵ Umwelt Zentralschweiz, „Rindviehstall der Zukunft“.

⁸⁶ Schweizer Bauer, „Zentralschweizer Leuchtturmprojekt“, 2023, https://www.ammoniak.ch/files/Bilder_Dokumente/Zimmermann/Schweizer-Bauer_Zimmermann_Merlischachen.pdf.

⁸⁷ Seitler, E. u. a., *Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2019*.

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

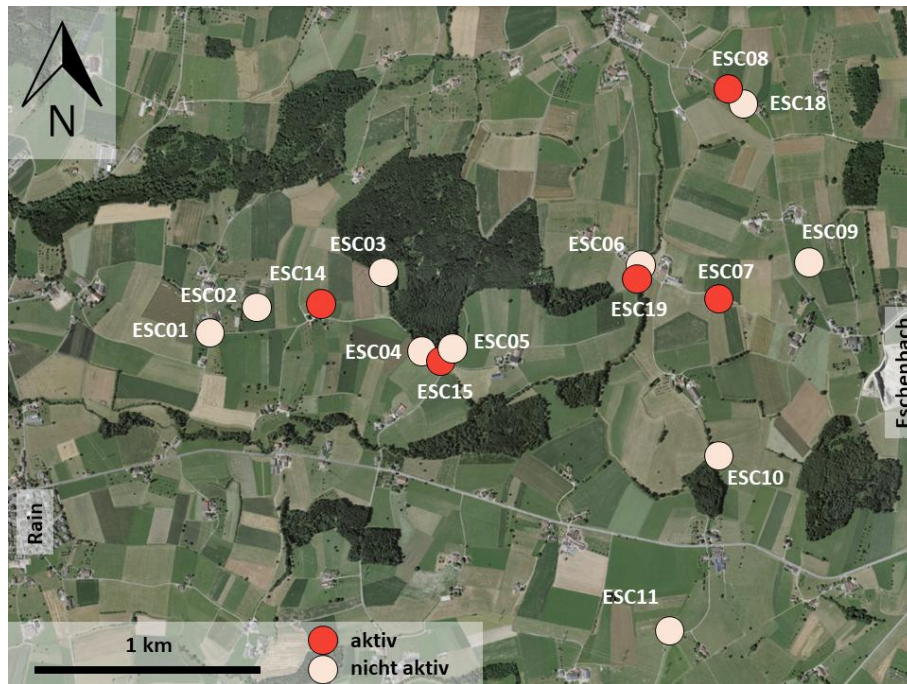
Im Messgebiet Wauwil wurde schon im Jahr 2000 mit Ammoniakmessungen begonnen. In den weiteren Jahren kamen ein Nord-Süd- und ein Ost-West-Transekt hinzu, um die lokal-räumliche Verteilung der Ammoniakkonzentration zu durchleuchten. Zusätzlich wurden rund um das Naturschutzgebiet Wauwiler Moos Ammoniakmessungen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



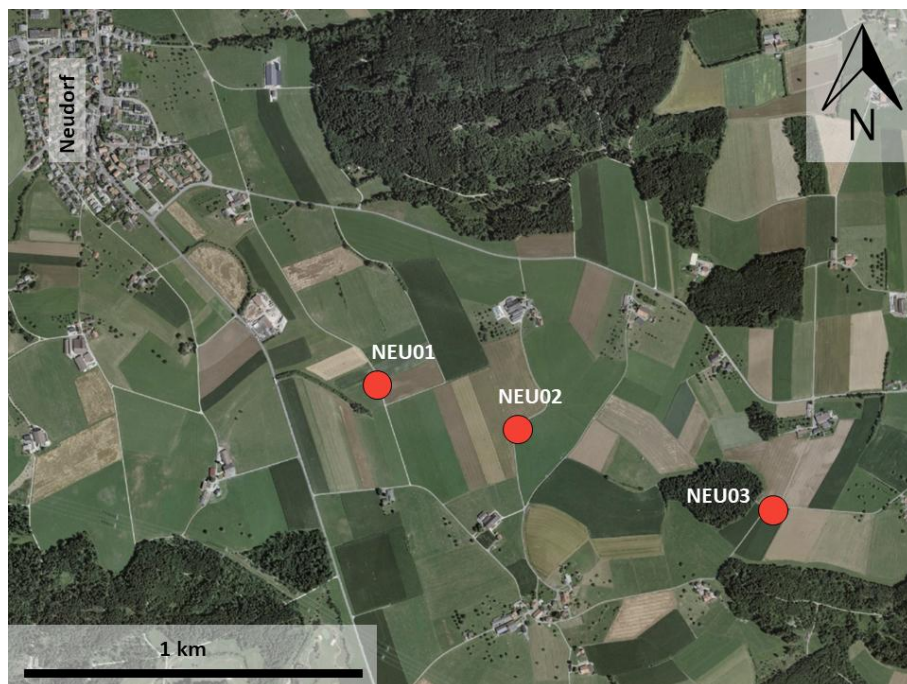
5.1.2. Eschenbach, Luzern

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.



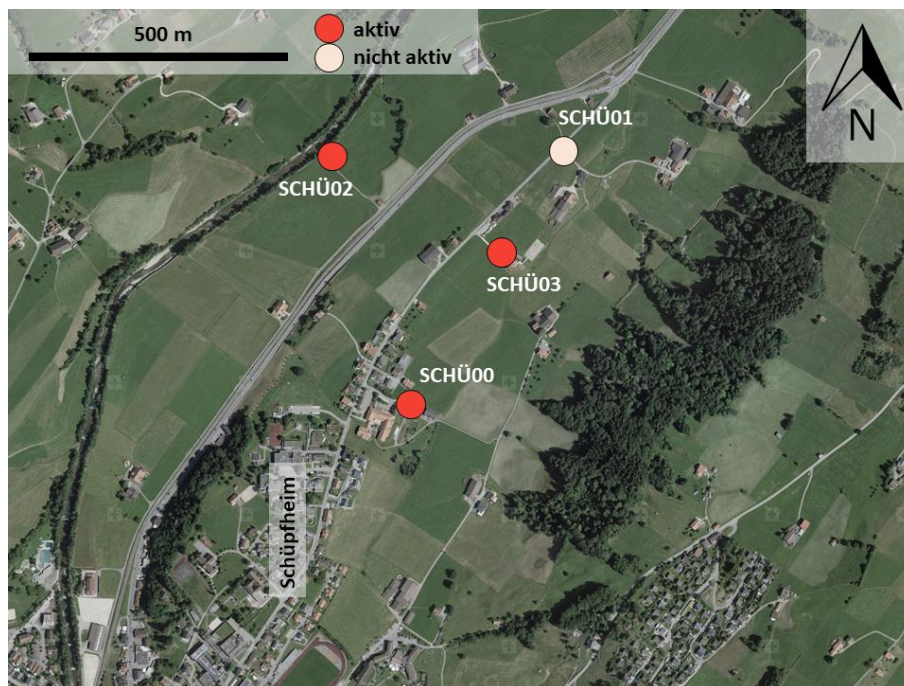
5.1.3. Neudorf, Luzern

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. Neuenkirch, Luzern

Im Jahr 2000 starteten die Ammoniakmessungen im Gebiet Neuenkirch. 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.



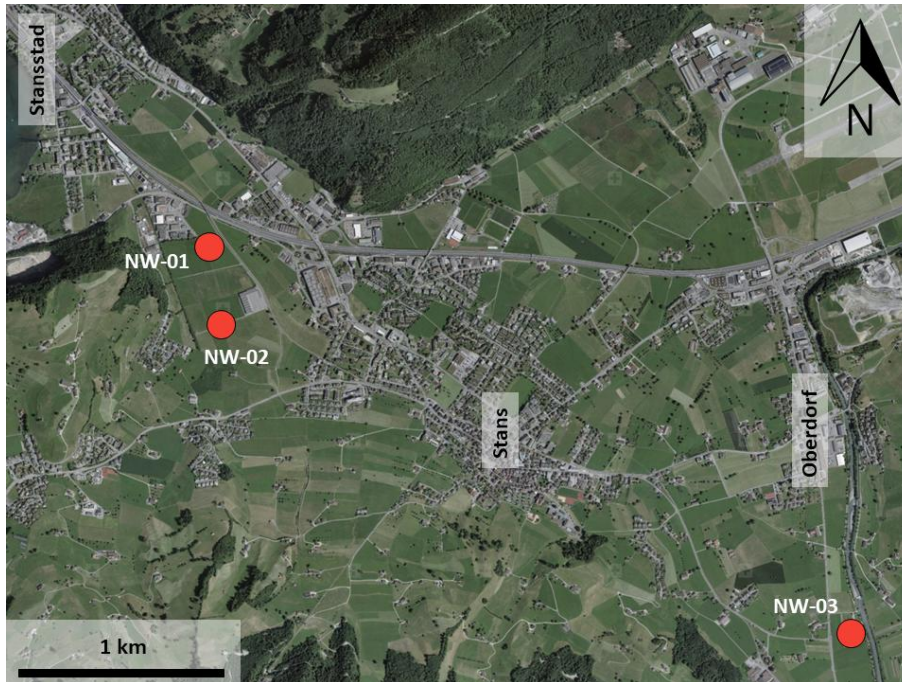
5.1.6. Root, Michaelskreuz, Luzern

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.



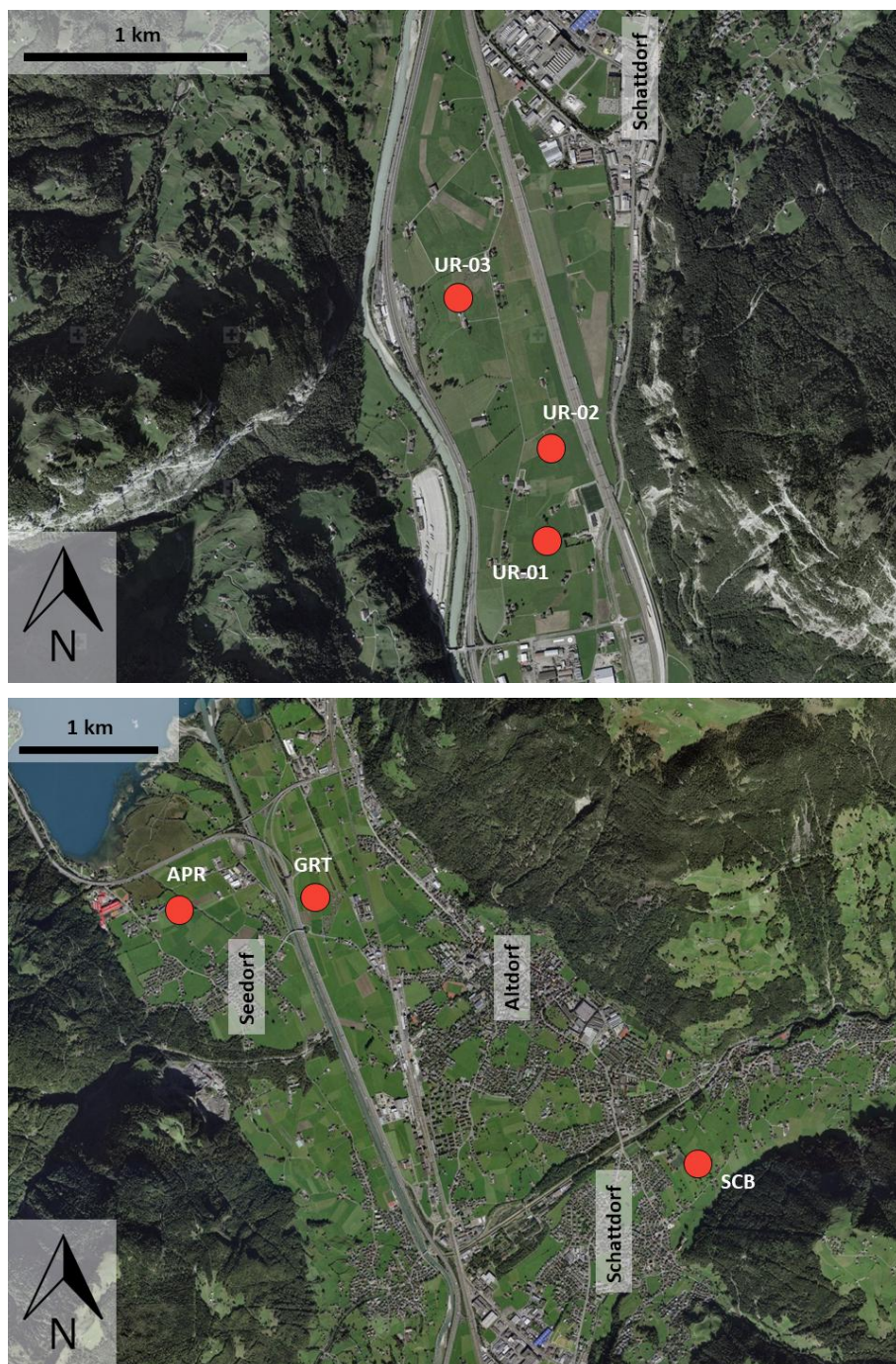
5.1.7. Nidwalden

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.



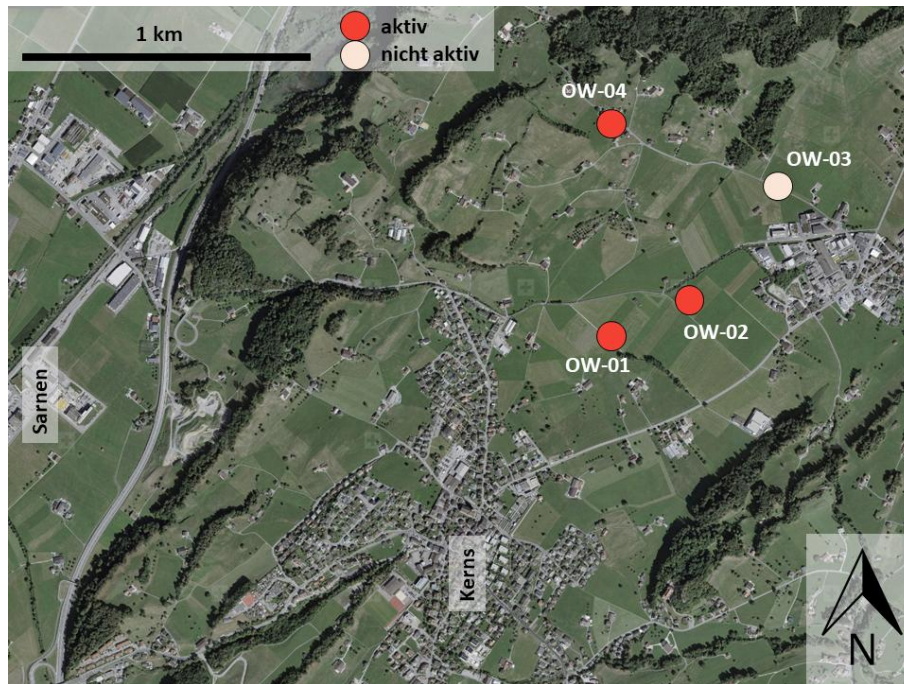
5.1.8. Uri

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.



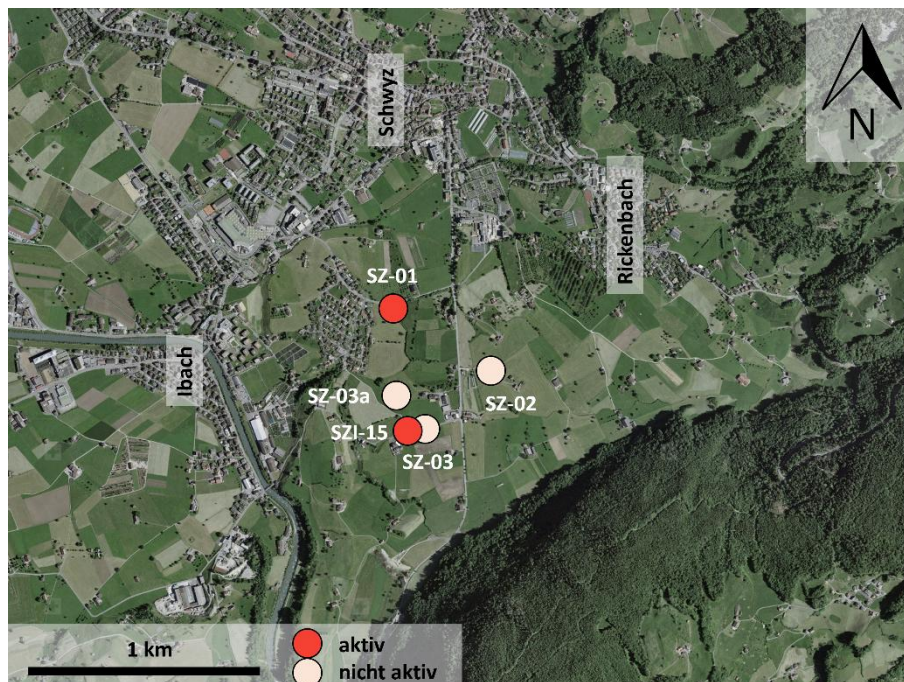
5.1.9. Obwalden

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. Im Jahr 2023 wurde der Messpunkt SZ-03a zu SZI15 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, Fräebühl 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 Streueflächen werden die umliegenden Flächen futterbaulich und eher extensiv bewirtschaftet.

- Frübüel (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.

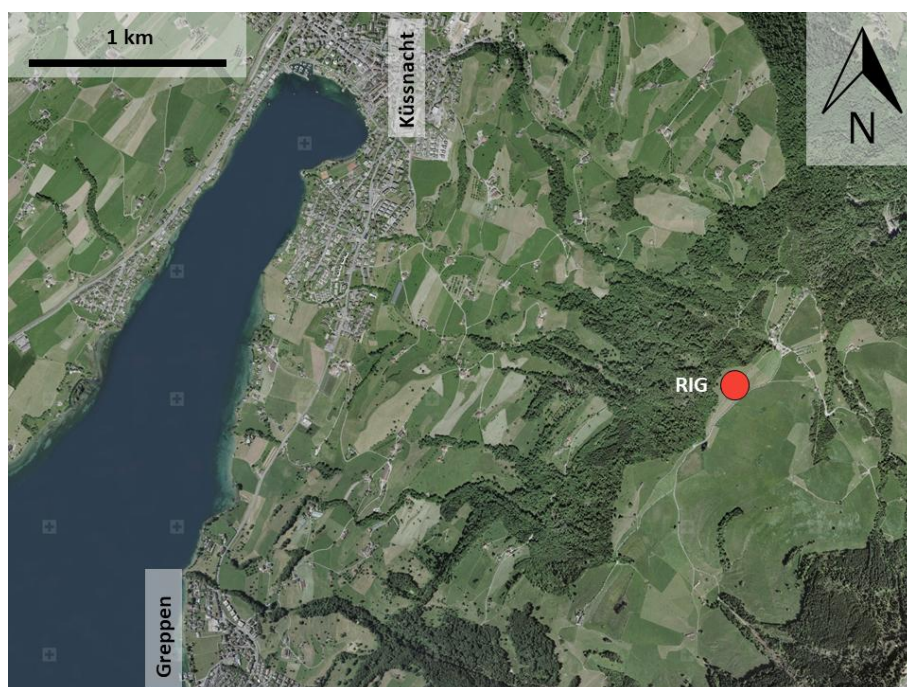


Neben fünf kantonalen Messstationen hat der Kanton Zug im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz zusätzlich drei Messpunkte installiert (ZG01, ZG02 und ZG03). Diese liegen im Gebiet nördlich von Hagendorn (Gemeinde Cham). Die Flächen um die Messpunkte werden acker- wie auch futterbaulich 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 Krite der Mülimannsegg, 600 m über dem Vierwaldstättersee auf gut 1'000 m ü. M.



5.2. Charakterisierung der Messpunkte

Tabelle 3: 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	2023	2024
WAU10	Wauwil 10	Luzern	2 644 735 1224 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	-	7.5
WAU13	Wauwil 13	Luzern	2 644 694 1224 173	10.9	10.3	9.2	9.0	10.0	9.5	9.8	10.9	11.1	12.3	10.0	9.0	10.1	9.2
WAU14	Wauwil 14	Luzern	2 643 364 1224 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	9.4	7.7
WAU16.2	Wauwil 16.2	Luzern	2 643 707 1224 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	4.8	4.5
WAU16.4	Wauwil 16.4	Luzern	2 643 707 1224 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	5.7	5.3
WAU17	Wauwil 17	Luzern	2 643 451 1225 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	7.5	6.1
WAU19	Wauwil 19	Luzern	2 644 113 1224 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	5.9	5.1
NEU01	Neudorf 1	Luzern	2 659 290 1224 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	-	6.2
NEU02	Neudorf 2	Luzern	2 659 706 1224 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	-	5.3
NEU03	Neudorf 3	Luzern	2 660 470 1224 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	-	4.4
SCHÜ00	Schüpfheim 0	Luzern	2 644 727 1201 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	-	4.9
SCHÜ01	Schüpfheim 1	Luzern	2 645 021 1201 587	12.9	9.7	9.6	10.2	11.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SCHÜ02	Schüpfheim 2	Luzern	2 644 537 1201 575	8.3	7.1	5.9	6.6	7.2	6.6	7.0	8.6	8.4	7.3	6.6	7	-	6.6
SCHÜ03	Schüpfheim 3	Luzern	2 644 883 1201 384	-	-	-	-	-	-	7.0	8.9	8.5	7.5	6.6	6.7	-	6.1
HOL01	Neuenkirch 1	Luzern	2 657 129 1216 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	8.8	7.4
HOL03	Neuenkirch 3	Luzern	2 657 229 1216 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	6.8	5.3
HOL04	Neuenkirch 4	Luzern	2 657 256 1216 902	12.6	10	9.4	9.9	9.2	8.9	9.9	11.5	10.2	9.8	10.0	12.7	11.3	12.2
RO	Root Michaelskreuz	Luzern	2 673 847 1218 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	-	2.7
ESC07	Eschenbach 7	Luzern	2 665 253 1221 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	10.8	8.4
ESC08	Eschenbach 8	Luzern	2 665 208 1221 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	9.2	8.3

ESC14	Eschenbach 14	Luzern	2 663 387	1 220 976	13.4	12	11.2	12.9	13.5	12.5	14.3	18.2	17.2	14.0	11.9	14.7	14.8	11.4
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	9.8	7.2
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	8.4	5.3
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	6.3	-
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	6.8	5.2
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	6.7	5.6
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	9.0	5.7
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	8.5	5.9
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	10.0	7.2
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	-	3.6
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	-	-
SZI15	Betti	RP A-ZS	2 692 510	1 207 054	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1
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	6.8	6.5
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	6.0	5.5
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	-	5.4
UR-APRO	Schloss A Pro	-	2 689 265	1 193 430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8	-	3.5
UR-GRT	Gartenmatt	-	2 690 175	1 193 550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.5	-	5.3
UR-SCB	Schattdorf-Bürglen	-	2 693 000	1 191 608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.9	-	3.5
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	-	7.0
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	6.0	4.5
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	-	3.7

FRUE	Früebüel	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	-	1.7
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	-	4.2
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	-	2.2
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	2.5	1.6
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	1.9	1.2
WAN01	Wangen 01	Kt. SZ	2 709 749	1 227 700	-	-	-	7.7	9.2	8.2	7.6	-	9.3	9.2	-	-	-	-
WAN01a	Wangen 01a	Kt. SZ	2 709 332	1 227 470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.3	-	5.8
SCHUB01	Schübelbach	Kt. SZ	2 712 631	1 226 837	-	-	-	-	-	-	-	-	14.1	14.3	-	-	-	-
SCHUB01a	Schübelbach	Kt. SZ	2 712 488	1 226 762	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.3	-	8.3
TUG01	Tuggen	Kt. SZ	2 714 630	1 228 761	-	-	-	-	-	-	-	-	7.8	7.6	6.4	7.2	-	5.9

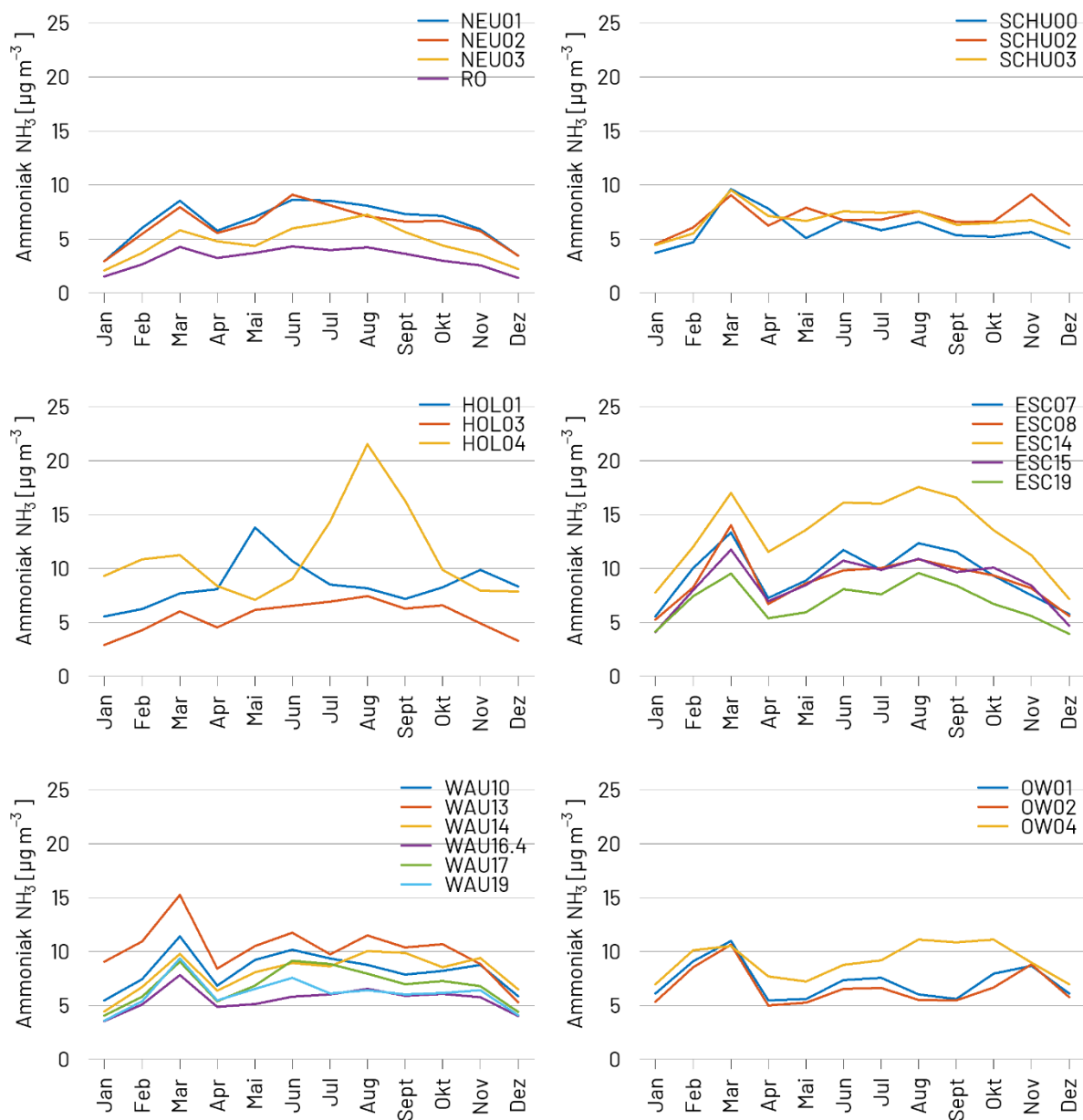
5.3. Jahresmittel nach Messgebieten

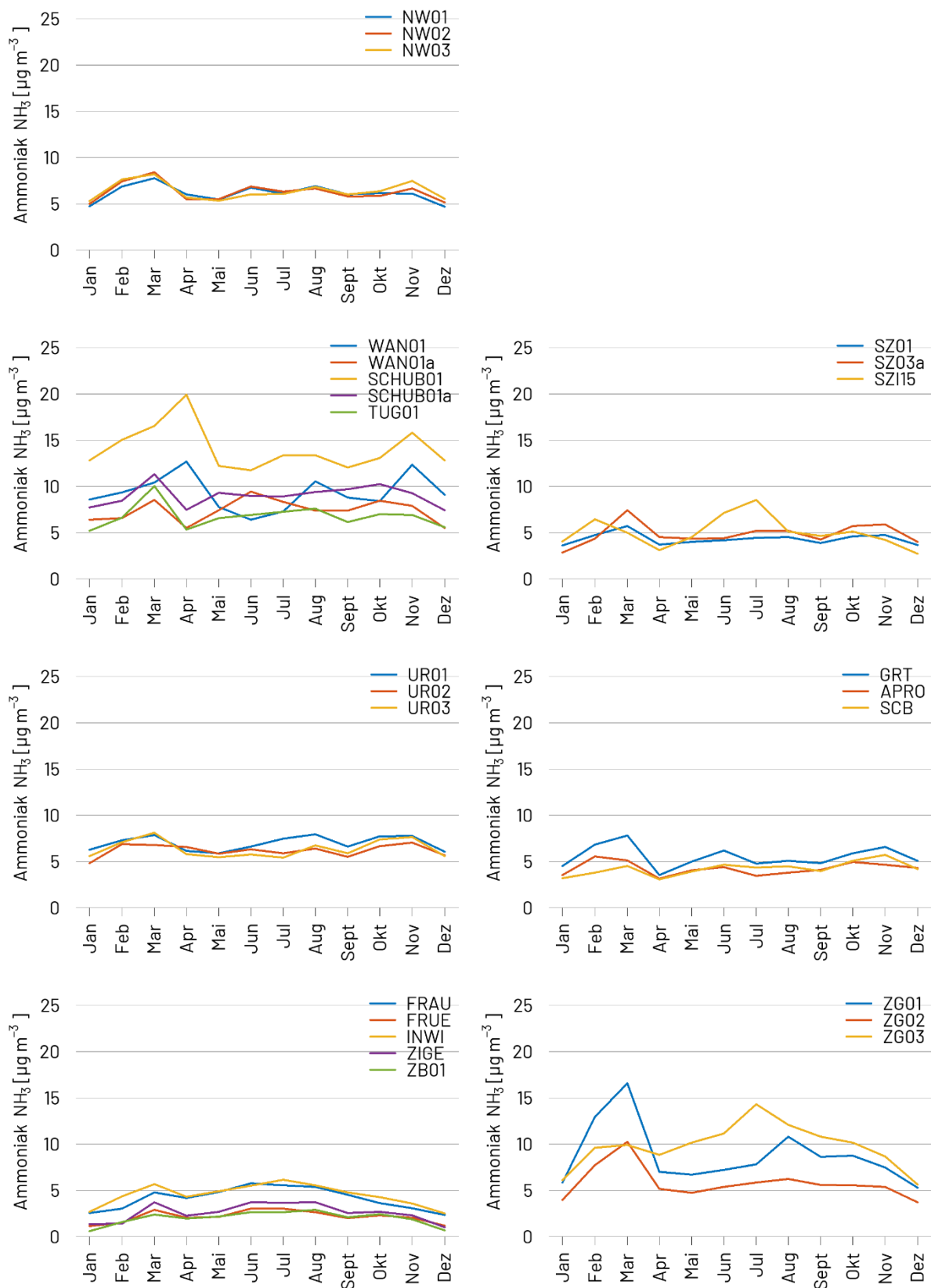




5.4. Jahresgang nach Messgebieten (2018 – 2024)

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

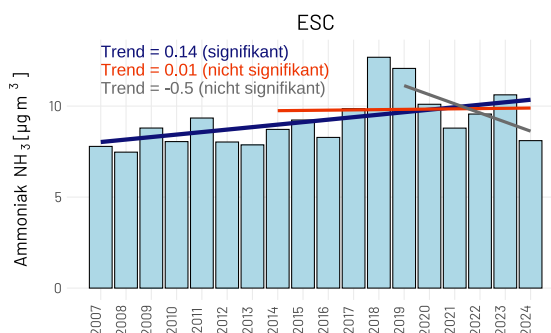
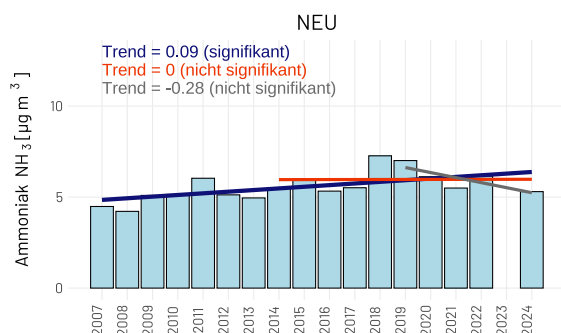




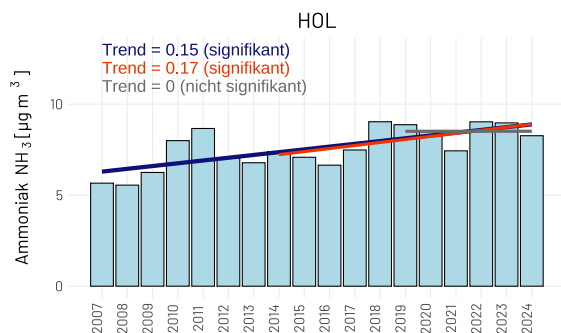
5.5. Trendberechnungen

5.5.1. Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

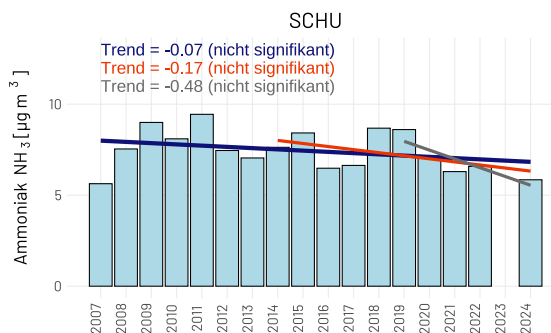
Unter den Grafiken sind jeweils die verwendeten Stationen für die Berechnung des Mittelwerts und der Trendwerte angegeben. Für Uri Nord und Ausserschwyz existieren noch keine Trendberechnungen.



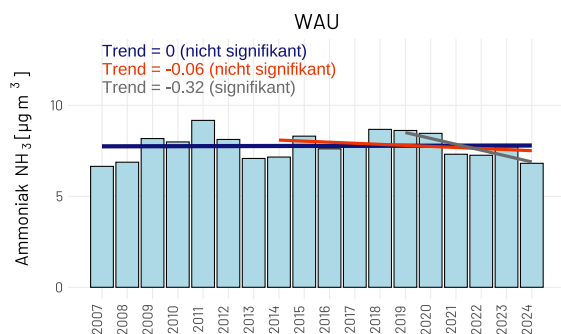
NEU01, NEU02, NEU03



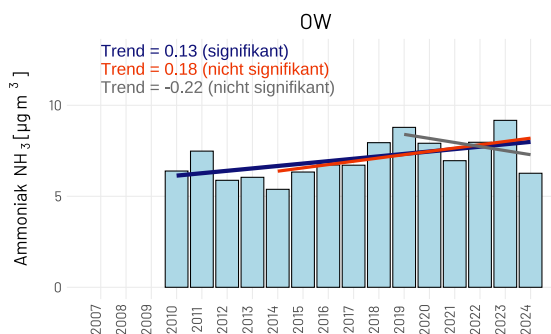
ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19



HOL01, HOL03

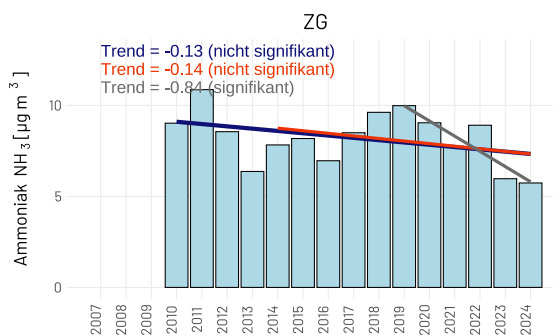
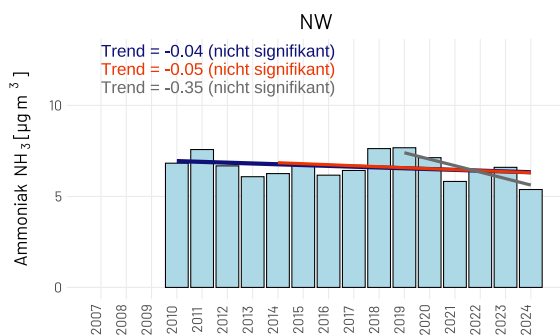


SCHU00, SCHU02

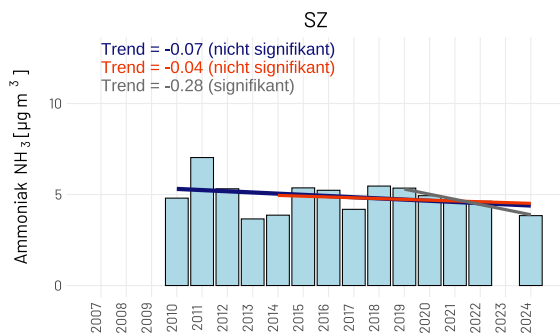


WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19

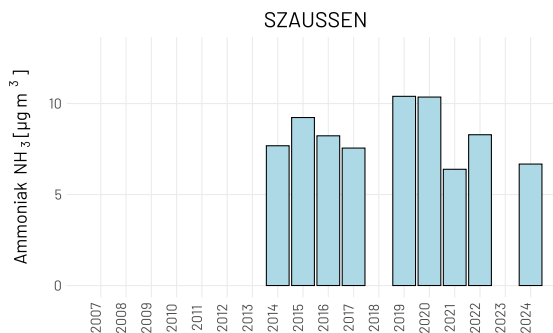
OW01, OW02



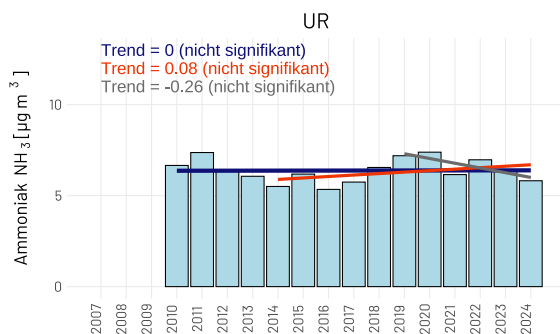
NW01, NW02, NW03



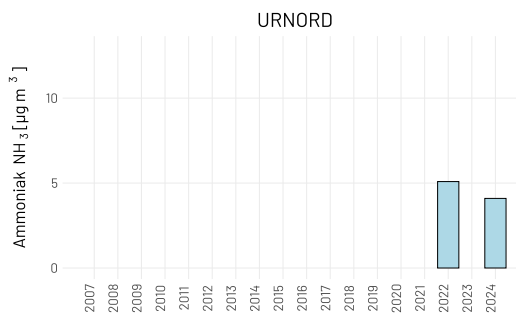
ZG02, ZG03



SZ01, SZ02, SZ03, SZ03a, SZI15



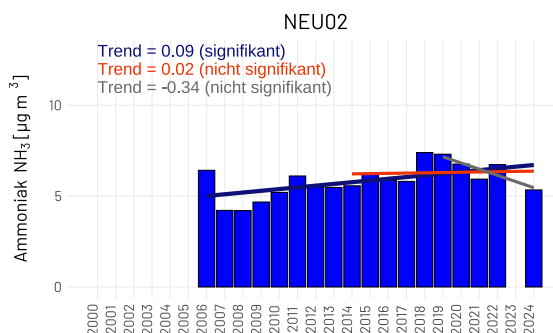
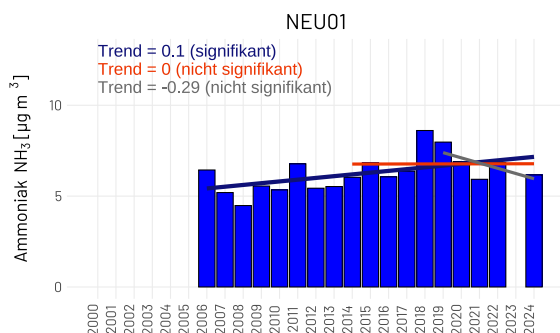
WAN01, WAN01a, SCHUB01, SCHUB01a, TUG01

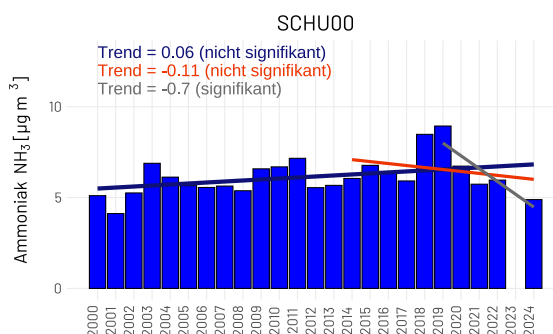
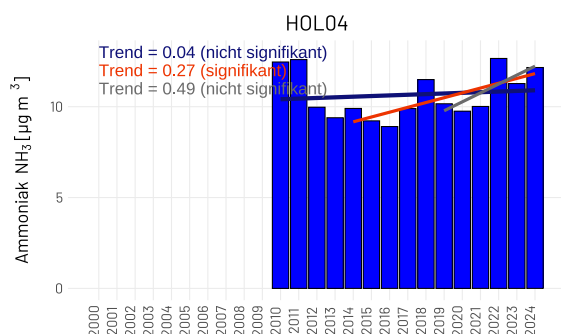
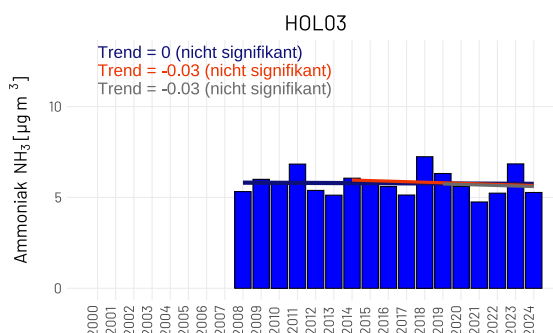
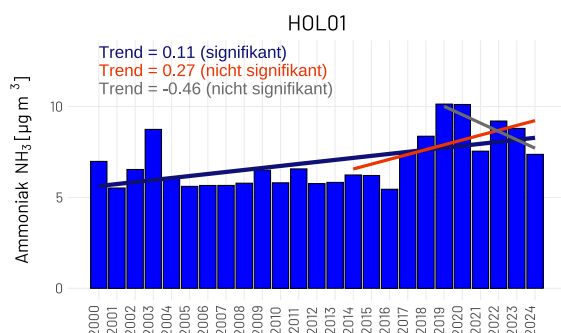
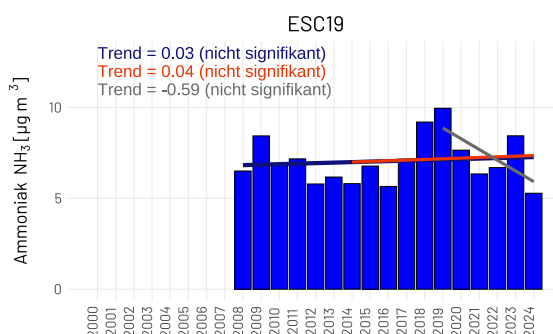
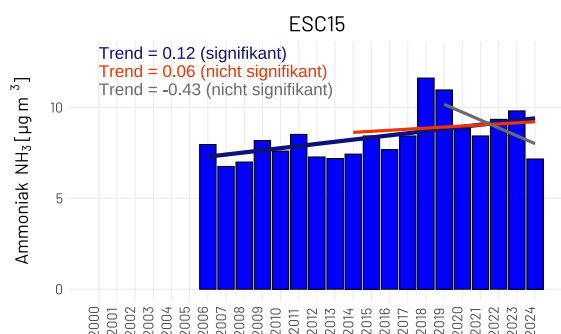
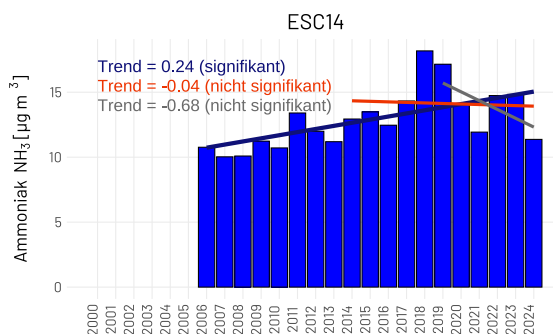
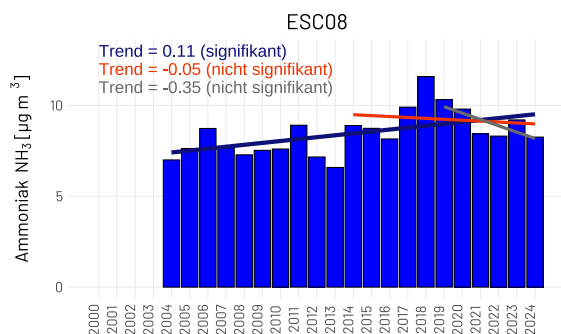
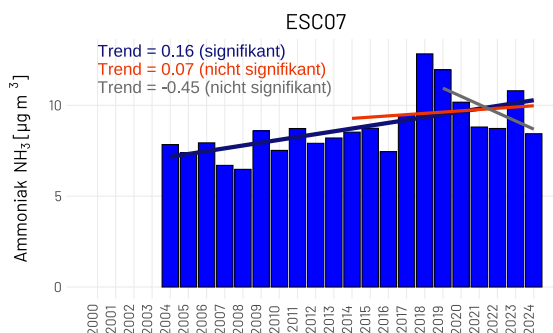
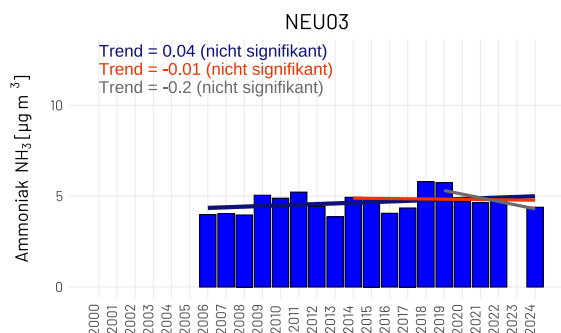


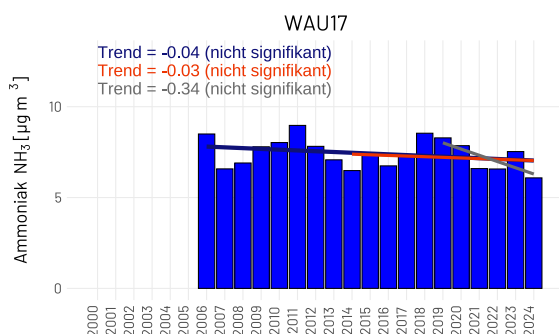
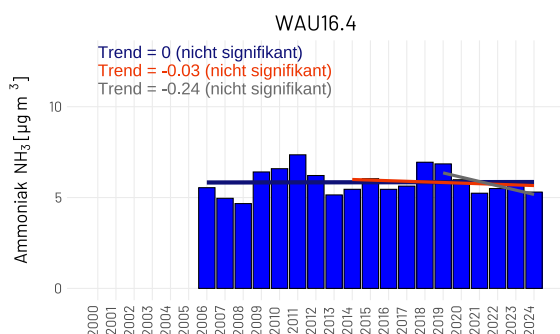
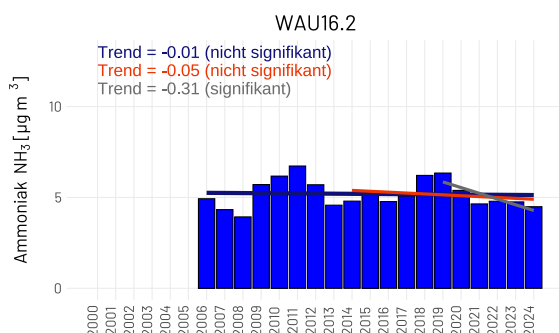
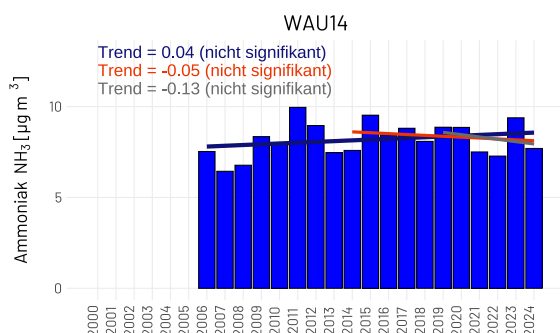
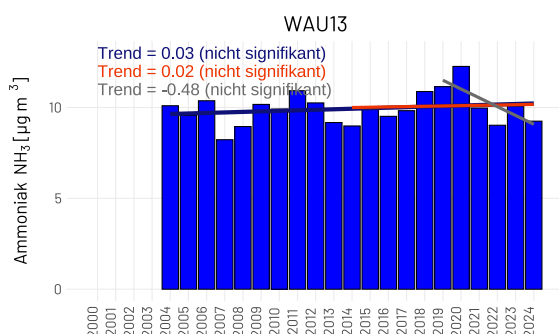
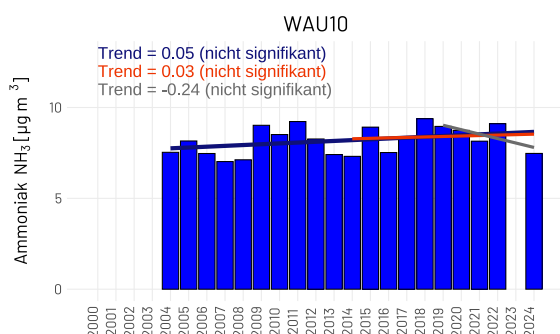
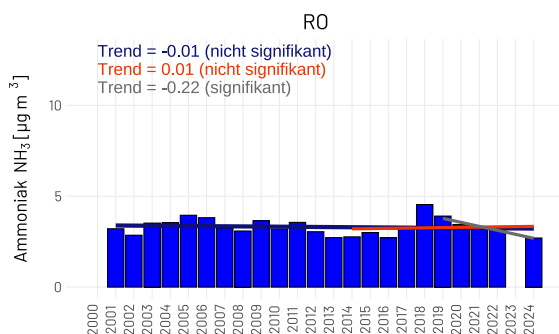
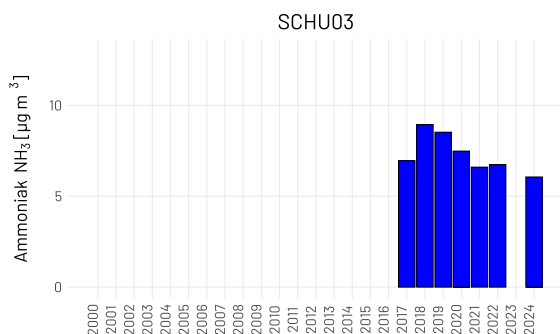
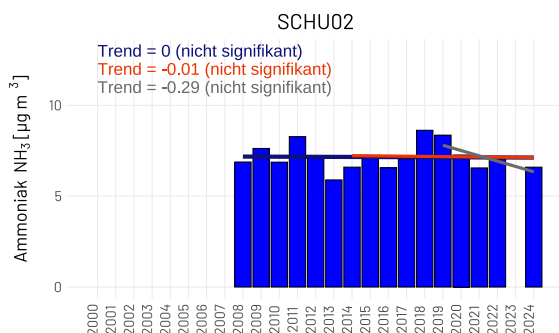
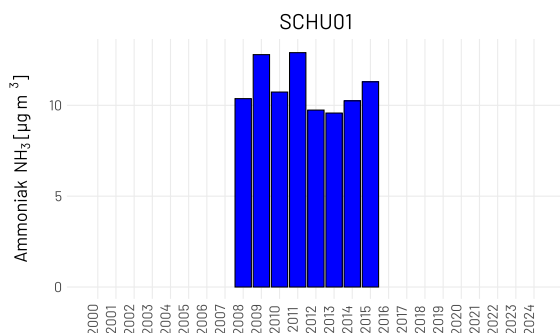
UR01, UR02, UR03

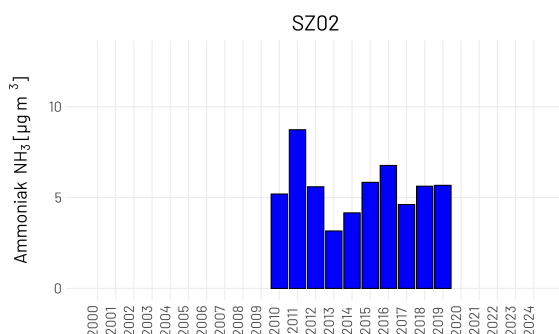
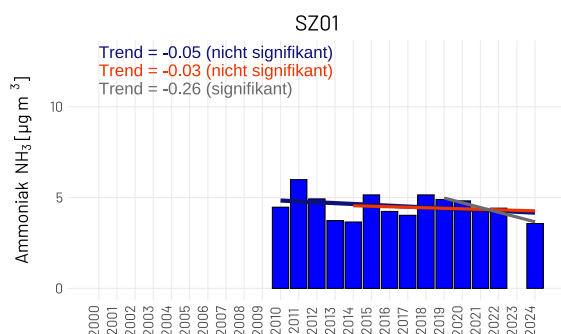
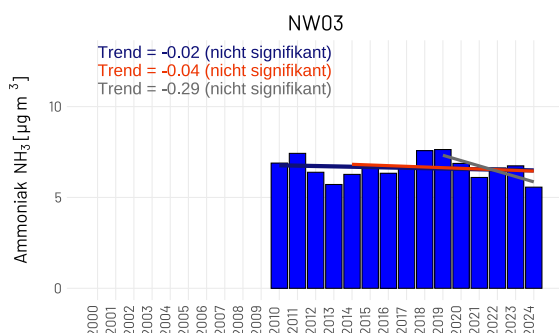
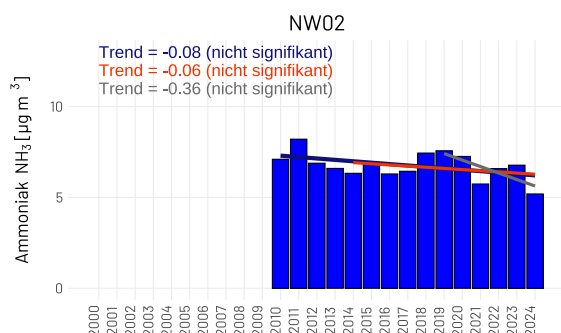
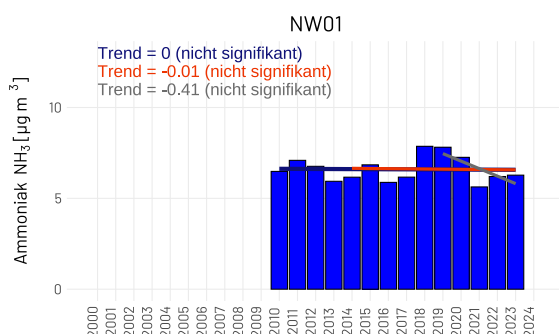
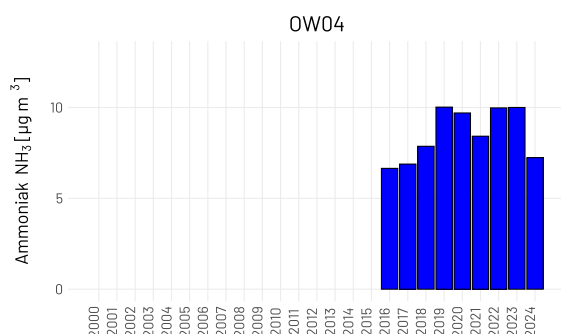
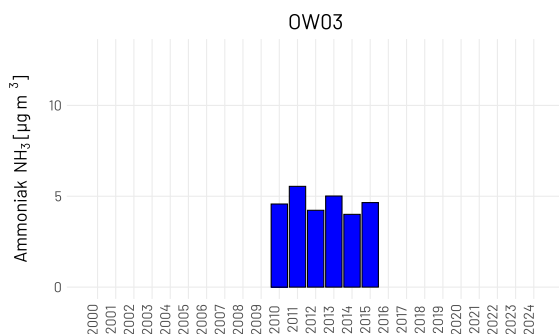
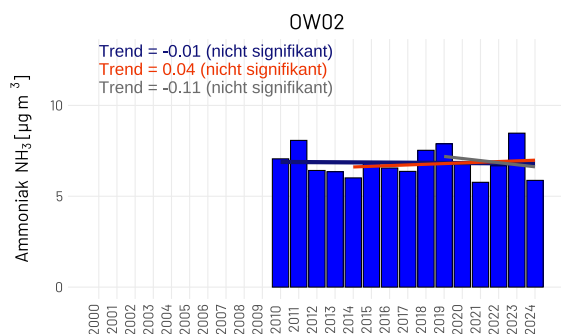
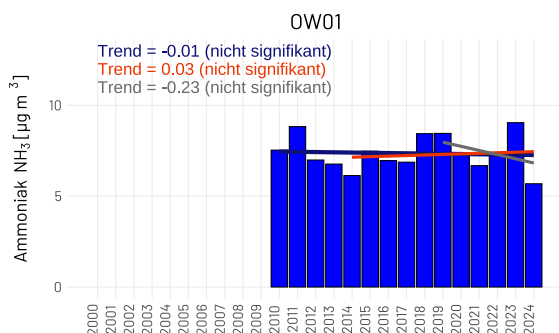
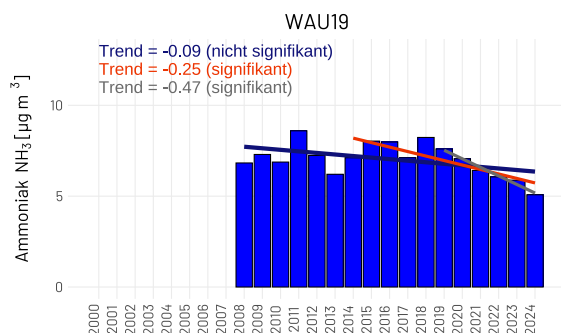
GRT, APR, SCB

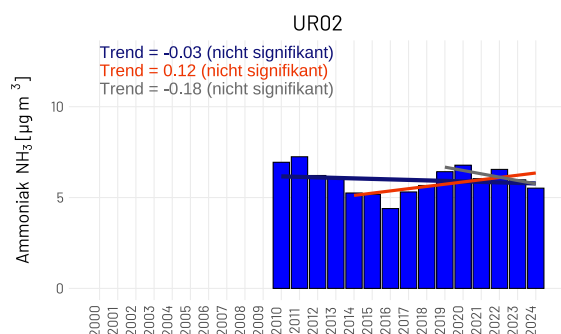
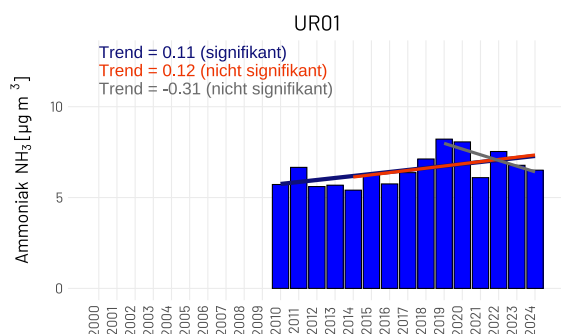
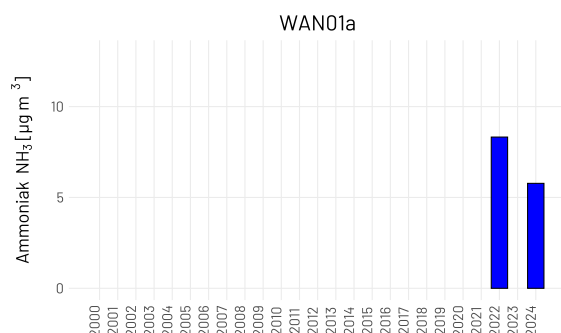
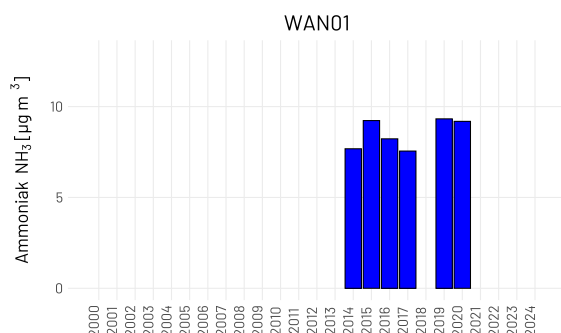
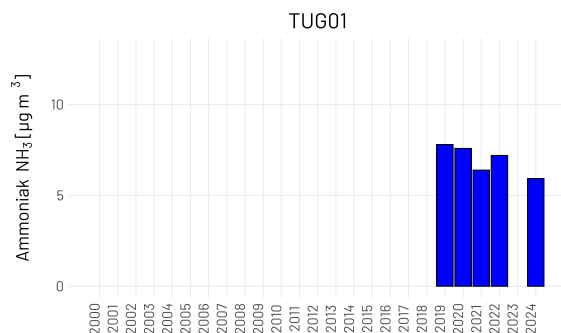
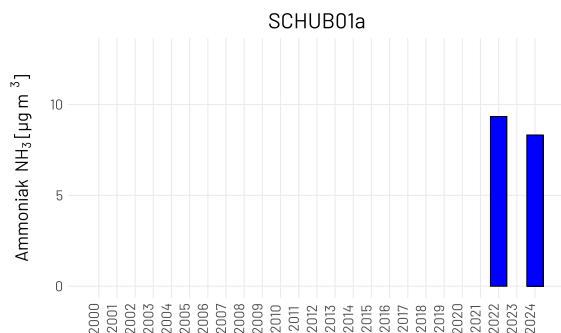
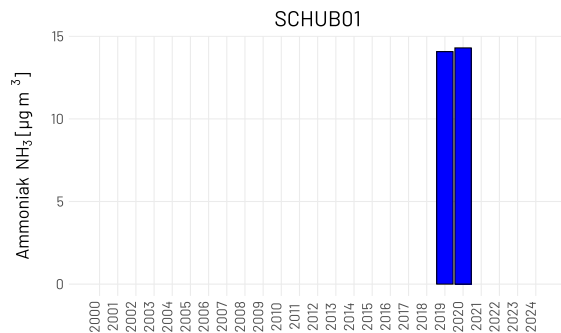
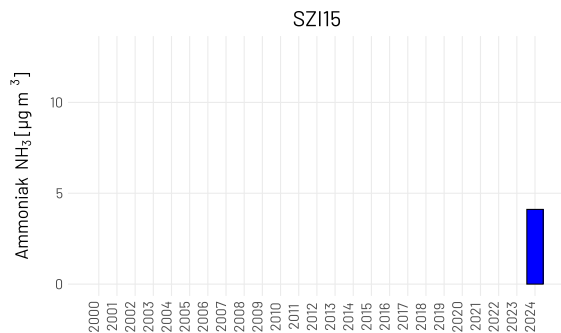
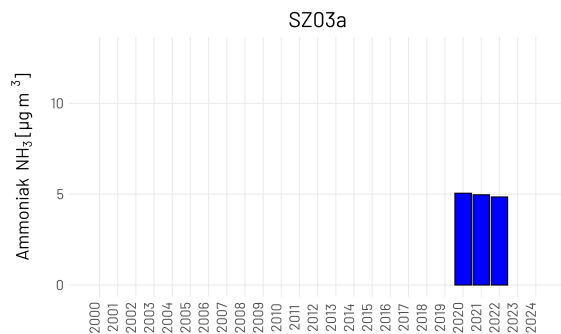
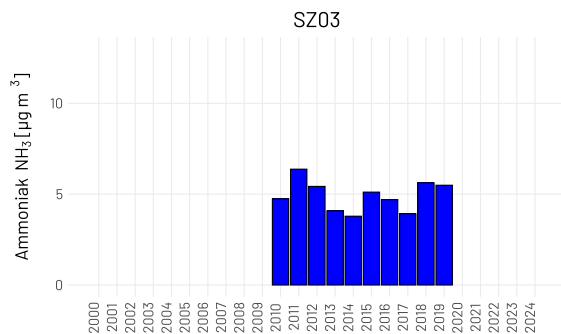
5.5.2. Jahresmittel-Trends nach Messpunkt

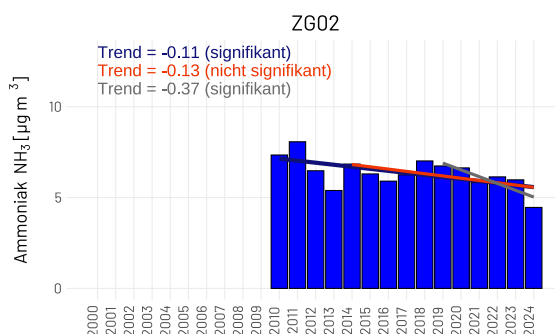
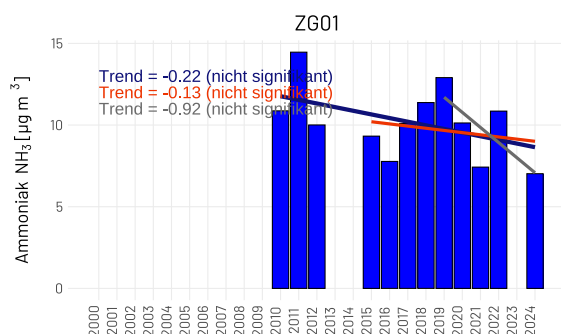
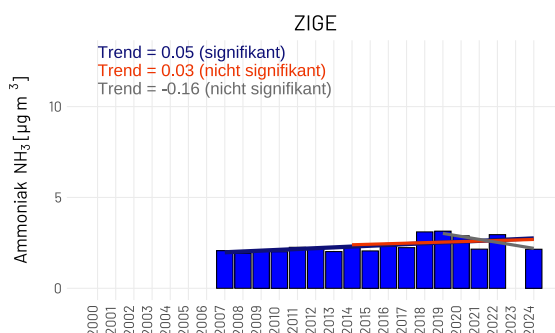
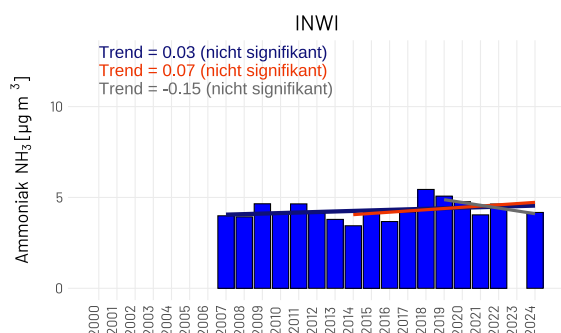
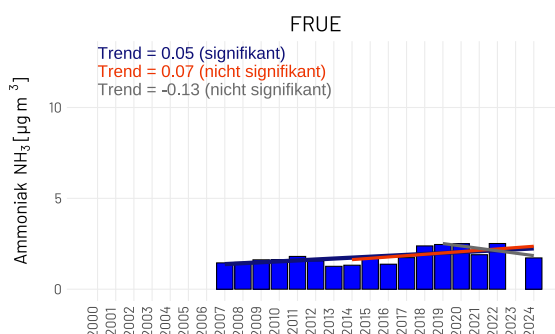
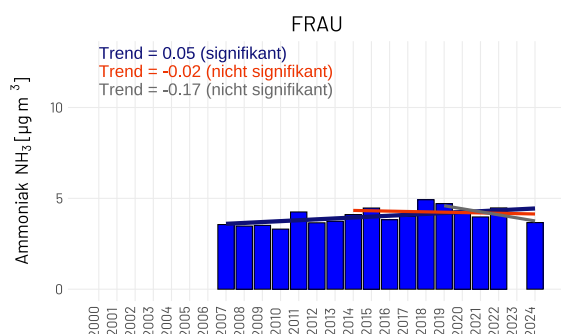
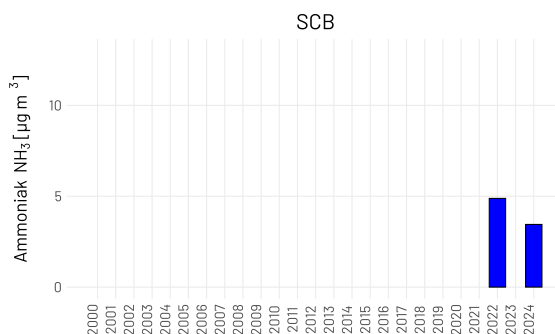
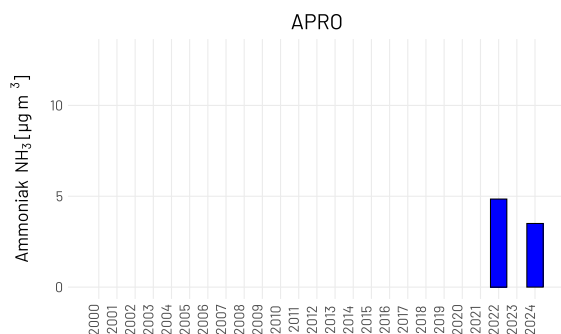
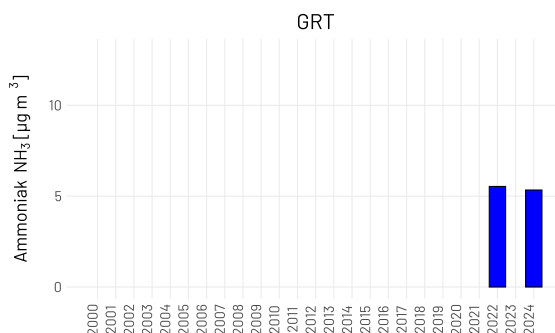
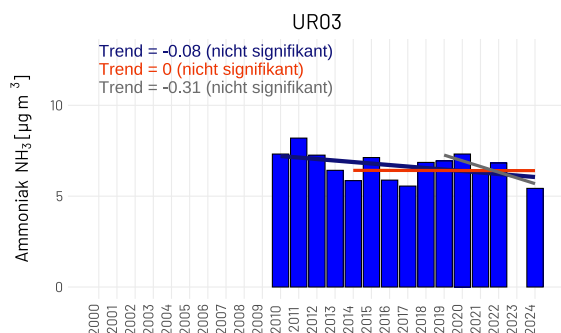


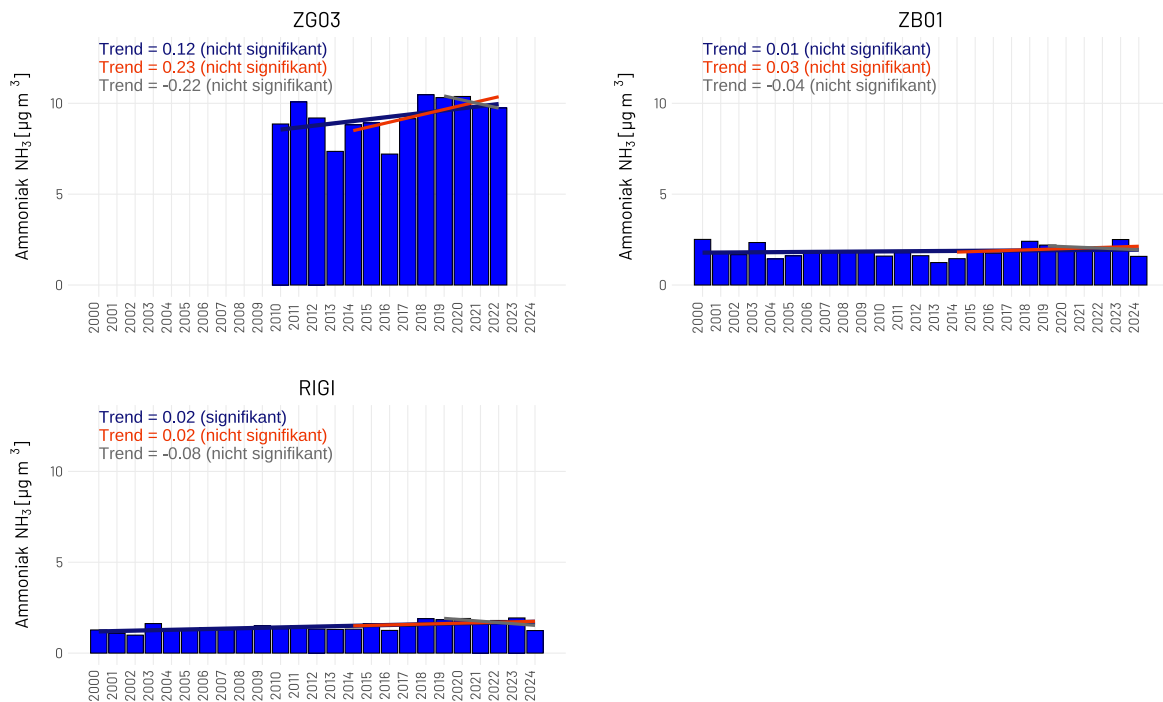












5.6. Anmerkungen zur statistischen Analyse

Die Trendanalysen der Daten in Kapitel 3 wurden, wie auch die restliche Datenanalyse, in R Studio durchgeführt. Für sämtliche Analysen wurde angenommen, dass die Messwerte unabhängig und gleichverteilt sind, auch wenn diese Annahmen bei Zeitreihen theoretisch verletzt sind. Ein Vergleich der linearen Trends mit der Methode der «Sen's slope» ergab aber keine wesentlichen Unterschiede im Endresultat (Datengrundlage: Messgebiete des Jahres 2022).

Das Signifikanzniveau α beträgt 5 %. Als Regressionsmodell wurde das lineare Modell gewählt. 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. 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 %. Um einen auf Niveau α statistisch signifikanten Trend zu zeigen, müssen beide Grenzen dieses Intervalls auf einer Seite der 0 liegen (bzw. das gleiche Vorzeichen haben).

Das Vertrauensintervall für die Steigung hängt von der erwarteten Steigung, den Freiheitsgraden (d.h. Anzahl Messungen), dem gesetzten Signifikanzniveau und dem Standardfehler ab. Seit dem Bericht 2024 wird das 95-%-Vertrauensintervall im Bericht nicht mehr gezeigt, stattdessen wird direkt angegeben, ob das Resultat der Trendberechnung signifikant ist oder nicht.

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

5.7. Übersicht über die Programme

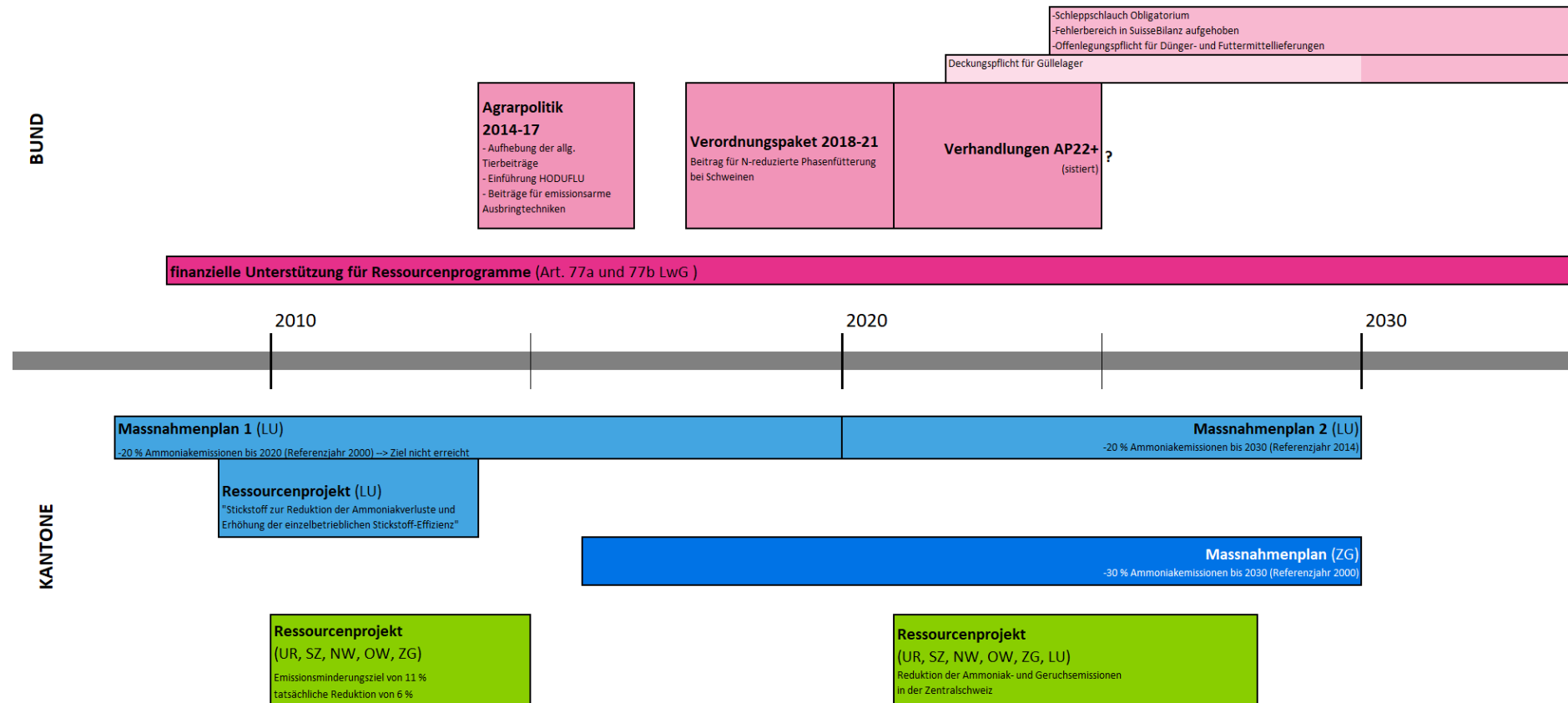


Abbildung 26: Übersicht über die Aktivitäten bezüglich Ammoniak auf nationaler Ebene und in der Zentralschweiz (Stand Anfang 2025). Es besteht keine Garantie auf Vollständigkeit.