inNET Umweltmonitoring



Messbericht Ammoniak

Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2021

Autorin
Dr. Hannah Wey

Geprüft
Dr. Christian Ruckstuhl

Umwelt Zentralschweiz

inNET Monitoring AG
Dätwylerstrasse 15
CH-6460 Altdorf
Schlossstrasse 3
CH-6005 Luzern
+41 41 500 50 40
info@innetag.ch
innetag.ch

Zusammenfassung

Ammoniak wird überwiegend von der **Landwirtschaft** emittiert. Vor allem beim Ausbringen und Lagern von Gülle und Mist sowie im Stall und auf dem Laufhof entstehen hohe Emissionen. Diese führen zu mehreren negativen Gesundheits- und Umwelteffekten, wie die Schädigung von Ökosystemen und dadurch die Verringerung der Biodiversität. Deshalb werden die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz an verschiedenen Orten überwacht, während Massnahmen zur Emissionsminderung umgesetzt werden.

Seit 2000 werden im **Kanton Luzern** und auf dem Zugerberg im Kanton Zug die Ammoniakimmissionen mit Passivsammlern gemessen. 2007 kamen vier Messpunkte im **Kanton Zug** hinzu. Im Zuge des **Ressourcenprojekts der Zentralschweiz** messen seit 2010 die Zentralschweizer Kantone Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug an landwirtschaftlich exponierten Standorten an je drei Messpunkten die Ammoniakkonzentrationen. Seit 2014 bzw. 2019 wird diese zusätzlich in Ausserschwyz an insgesamt drei Messpunktenerhoben. Die Messgebiete liegen teils in Landwirtschaftszonen und gleichzeitig in der näheren Umgebung von ökologisch sensitiven Gebieten. Das gesamte Messnetz dient als Grundlage für die Überwachung der **Massnahmenpläne** «Ammoniak» der Kantone Luzern und Zug sowie als Wirkungsmonitoring der **Ressourcenprogramme** zur Ammoniakminderung. Die beiden Massnahmenpläne, welche behördenverbindliche Pläne nach LRV darstellen, sind beide aktiv. Die Ressourcenprogramme, welche ihrerseits auf sechs Jahre beschränkte Anreizprogramme sind, wurden im Jahr 2014 (Kanton Luzern, Ressourcenprojekt Stickstoff) respektive 2015 (übrige Zentralschweizer Kantone, Ressourcenprojekt Ammoniak) beendet.

Die Ammoniakkonzentrationen **überschreiten im mehrjährigen Mittel (2010 - 2021) den Critical Level** von 3 µg m^{-3} in 13 von 17 Messgebieten mit gültigen Jahresmittelwerten **zum Teil sehr deutlich**. Über alle Messgebiete gerechnet beträgt der Faktor 1.78. Im Vergleich zum Vorjahr ist dies leicht mehr, was aber mathematisch begründet ist bzw. durch den Miteinbezug der Messpunkte ZG-01 und HOL04 zustandekommt.

Selbst wenig belastete Messpunkte in der Nähe empfindlicher Ökosysteme (Zigerhüttli, Früebüel und Zugerberg) zeigen im mehrjährigen Jahresmittel eine Überschreitung des Critical Levels von 1 µg m^{-3} für empfindliche Moose und Flechten. Ausgewählte Standorte zeigen, dass die Stickstoffdeposition in der Zentralschweiz die Critical Loads, welche den höchsten noch tolerierbaren Stickstoffeintrag ohne schädliche Veränderung der Ökosysteme beschreiben, deutlich überschreitet.

Die Messgebiete im Kanton Luzern mit Messungen seit 2007 zeigen alle eine **Zunahme der Ammoniakkonzentration** mit statistisch signifikanten Veränderungen in den Messgebieten Eschenbach, Neudorf und Holderhus (+0.22 / +0.13 /+0.15 µg m^{-3} a^{-1}) bzw. Schüpfheim (+0.08 m^{-3} a^{-1}, nicht statistisch signifikant). Die Messgebiete des Zentralschweizer Ressourcenprojekts mit Daten ab 2010 zeigen **langfristig gleichbleibende Tendenzen**, wobei kein Messgebiet eine statistisch signifikante Abnahme der Ammoniakkonzentration zeigt. Von den Messpunkten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen im Kanton Zug mit Messungen seit 2007 zeigen zwei Messpunkte gleichbleibende Ammoniakimmissionen (Inwil, Zugerberg). Die Messpunkte Frauental, Zigerhüttli und Früebüel verzeichnen langfristig eine statistisch signifikante Zunahme (+0.07 / +0.06 / +0.06 µg m^{-3} a^{-1}).

In früheren Jahren zeigten die Ammoniakimmissionen im Jahresgang eine deutliche **Saisonalität** mit je einem Peak im Frühling und Herbst. Der Jahresverlauf 2021 ist ebenfalls durch einen Frühlingspeak charakterisiert. Die Sommerpeaks sind unterschiedlich ausgeprägt, die Herbstpeaks werden im November grösstenteils sichtbar. Somit wurden 2021 wiederum hohe Ammoniakkonzentrationen gemessen, welche allerdings tiefer liegen als diejenigen zwischen 2018 und 2020. Ein Grund für diese Entwicklungen ist unter anderem die spezielle Witterung der letzten Jahre mit hohen Temperaturen und trockenen Perioden (2018–2020). Durch diese meteorologischen Verhältnisse entwich viel Stickstoff in Form von Ammoniak aus der Gülle und verweilte anschliessend in der Atmosphäre. Im Gegensatz dazu zeigte das Jahr 2021 einen kühlen Frühling mit verregnetem Sommer, wodurch die Ammoniakverluste zurückgingen. Dies heisst jedoch nicht, dass der Stickstoffverlust aus der Landwirtschaft insgesamt kleiner wurde. Für eine ganzheitliche Analyse diesbezüglich müsste die Nitratauswaschung quantifiziert werden. Es wird generell empfohlen, Gülle nur bei kühlem und feuchtem Wetter auszubringen. Aufgrund der Immissionsdaten muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Landwirtinnen und Landwirte aus berechtigten betrieblichen Gründen zwischen 2018 und 2020 die Gülle trotz der anhaltenden warmen Trockenheit ausgebracht haben.

Das Reduktionsziel 2017, die Ammoniakemissionen auf nationalem Level im Vergleich zu 2010 um 25 % zu senken, **wurde nicht erreicht**.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **4**
1.1 Landwirtschaft in der Zentralschweiz . . . 7
1.2 Richtwerte und Beurteilung . . . 8
1.3 Übersicht Messungen in der Zentralschweiz . . . 9
1.4 Messperioden aller Messpunkte . . . 11
1.5 Messunsicherheit der Passivsammler . . . 13

2 NH_3-Belastung **14**
2.1 Mittlerer Jahresgang . . . 14
2.2 Mehrjahresmittelwerte . . . 16
2.3 Verlauf der Ammoniakkonzentration . . . 18
2.4 Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung . . . 22

3 Trendanalyse **23**
3.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten . . . 23
3.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkten . . . 27
3.3 Stickstofffrachten durch Ammoniak . . . 29
3.4 Einfluss der Meteorologie auf NH_3-Trends . . . 33

4 Diskussion **34**

5 Anhang **35**
5.1 Detaillierte Standortbeschreibungen . . . 35
5.1.1 Wauwil, Luzern . . . 35
5.1.2 Eschenbach, Luzern . . . 36
5.1.3 Neudorf, Luzern . . . 36
5.1.4 Schüpfheim, Luzern . . . 37
5.1.5 Holderhus, Luzern . . . 37
5.1.6 Root Michaelskreuz, Luzern . . . 38
5.1.7 Nidwalden . . . 38
5.1.8 Obwalden . . . 39
5.1.9 Uri . . . 39
5.1.10 Schwyz . . . 40
5.1.11 Zug . . . 41
5.1.12 Rigi-Seebodenalp (NABEL) . . . 42
5.2 Charakterisierung der Messpunkte . . . 43
5.3 Mittlerer Jahresgang der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten . . . 45
5.4 Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2017 - 2021) . . . 47
5.5 Trendberechnugen . . . 48
5.5.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten . . . 48
5.5.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkt . . . 49
5.6 Frachten . . . 54
5.7 Anmerkungen zur statistischen Analyse . . . 56

1 Einleitung

Der Luftschadstoff Ammoniak (NH_3) führt auf lokaler bis globaler Ebene zu mehreren Umwelt- und Gesundheitsproblemen: Generell wird beim Ammoniaktransport Stickstoff (N) über die Luft verfrachtet, wobei hohe Stickstoffeinträge in empfindlichen Ökosystemen zu einem Verlust der Artenvielfalt führen. Zudem resultiert diese Überdüngung in einer beschleunigten Versauerung der Böden sowie zum Austrag von Nitrat ins Grundwasser. Nebst dem negativen Einfluss auf Ökosysteme nach der Deposition trägt Ammoniak in der Luft wesentlich zur Bildung von sekundärem Feinstaub bei und hat somit negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Schliesslich ist Lachgas (N_2O), welches durch chemische Transformation von Ammoniak entstehen kann, ein klimawirksames Gas mit einem Treibhausgaspotential von 273 CO_2-eq.[1] Durch die Bildung von Ammoniak entstehen Geruchsemissionen, die von der Bevölkerung oftmals als störend empfunden werden.

In der Schweiz haben zwei Drittel der Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme ihren Ursprung in Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft.[2] Dieser Sektor trägt 94 % zu den gesamten Ammoniakemissionen bei. Innerhalb der Landwirtschaft trug die Tierproduktion zu 93 % am stärksten zu den Emissionen bei. Diese entstehen hauptsächlich beim Ausbringen von Gülle und Mist (44 %), im Stall und Laufhof (36 %) sowie beim Lagern von Dünger (11 %).[3]

Im Jahr 2020 betrugen die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft landesweit 41.3 kt NH_3-N bzw. 50.1 kt NH_3 (Abbildung 1).[4] Von 1990 bis 2003 zeigt sich in diesem Sektor eine Abnahme der Ammoniakemissionen, mit einem leichten Anstieg bis 2008 und seither wiederum mit einer leichten Abnahme. 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.[5]. Kupper (2022) vermerkt, dass sich Faktoren, welche zu einer Emissionszunahme bzw. -abnahme führen, sich zwischen 1990 und 2020 weitgehend gegenseitig aufheben.

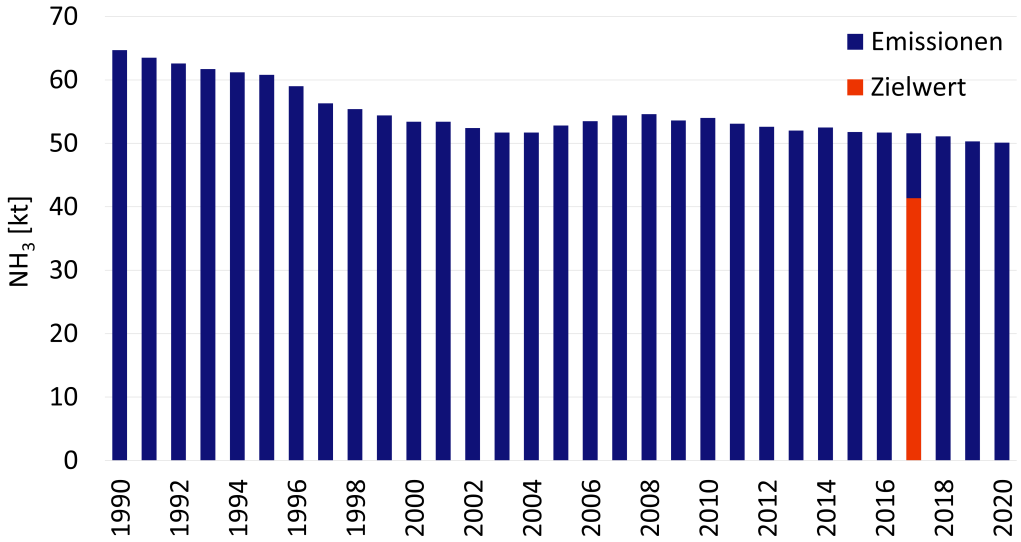


Abbildung 1: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft in der Schweiz von 1990 bis 2020.[6] Der rote Balken zeigt den vom BAFU kommunizierten Zielwert für 2017.

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

[2] BAFU (2022). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe beeinträchtigen auch die Biodiversität. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/stickstoffhaltige-luftschadstoffe-beeintraechtigen-auch-die-biod.html. Letzter Zugriff: 16.06.2022.

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

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

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

Seit 2008 kann der Bund Massnahmen zur Senkung von Ammoniakemissionen in den Kantonen finanziell unterstützen (Ressourcenprogramm, Art. 77a und 77b LwG). In diversen Kantonen sind Projekte zur Reduktion der Ammoniakemissionen und dem effizienteren Einsatz von Stickstoff lanciert worden. Im Kanton Luzern wurde 2007 der Massnahmenplan zur Reduktion der Ammoniakbelastung von der Regierung verabschiedet und zusätzlich zwischen 2009 und 2014 das Ressourcenprojekt «Stickstoff zur Reduktion der Ammoniakverluste und Erhöhung der einzelbetrieblichen Stickstoff-Effizienz» umgesetzt. Die Kantone Uri, Schwyz, Nidwalden, Obwalden und Zug haben zwischen 2010 und 2015 gemeinsam das Ressourcenprojekt «Ammoniak Zentralschweiz» durchgeführt. Im Kanton Zug wurde der Massnahmenplan «Ammoniak 2016 bis 2030» erarbeitet und verabschiedet. Jedes dieser Projekte enthält verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Ammoniakverluste in der Landwirtschaft.

Im Dezember 2015 publizierte das BAFU den Statusbericht der «Umweltziele Landwirtschaft». Darin werden die landesweiten Entwicklungen der Umweltziele seit 2008 erörtert und aufgezeigt, welcher Handlungsbedarf weiterhin besteht. Im Bereich Ammoniak wurde folgendes nationale Umweltziel festgelegt: „Die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft betragen maximal 25‘000 t N/Jahr." Die Agrarpolitik 2014–2017 hatte als nationales Etappenziel 2017 eine Einschränkung der Ammoniakemissionen auf 41’000 t vorgesehen. Drei Massnahmen der allgemeinen Agrarpolitik 2014–2017 sollten dem Erfolg dieses Projektziels beitragen. Es sind dies die Pakete «Aufhebung der allgemeinen Tierbeiträge», «Einführung HODUFLU»[7] und «Einführung Ressourceneffizienzbeiträge für emissionsarme Ausbringtechniken»[8].

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

In der Strategie der Agrarpolitik 22+ (AP22+) sind Massnahmen gegen Nährstoffverluste enthalten, so zum Beispiel ein effizienter Stickstoff-Einsatz inkl. Reduktion der Ammoniakemissionen. Im Frühling 2021 haben jedoch sowohl Stände- als auch der Nationalrat die Verhandlungen zur AP22+ sistiert. Die Beratungen werden frühestens im Frühling 2023 wiederaufgenommen.[9] Jedoch wurde kurz darauf ein Absenkpfad für Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft von 20 % bis 2030 festgelegt.[10] Dazu müssen emissionsarme Ausbringtechniken vermehrt angewendet werden. Mit Inkrafttreten der revidierten Luftreinhalte-Verordnung wollte der Bundesrat ab 2022 ein Schleppschlauch-Obligatorium einführen. Dieses wurde unter anderem wegen Lieferengpässen der entsprechenden Maschinen auf 2024 verschoben.[11]

Weiter wurde beschlossen, dass in der Suisse-Bilanz der erlaubte Fehlerbereich von (plus) 10 % ab 2024 aufgehoben wird. Das heisst, dass eine betriebliche Nährstoffbilanz neu höchstens bei 100 % liegen darf, um die entsprechenden Direktzahlungen zu bekommen.[12] Auch die Offenlegungspflicht der Futter- und Düngemittellieferungen soll dem gesetzten Reduktionsziel beitragen. Durch diese Mittelungspflicht für Abgeber von Mineraldünger und Kraftfutter, analog zu Gülledaten im HODUFLU, werden Nährstoffflüsse transparent und digital ausgewiesen, womit die Bilanzrechnungen genauer werden.[13]

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

[6] Bass, A.-A., Kegel, R., Leuenberger, D., Müller, B., Schenker, S. (2022, in preparation). Switzerland's informative inventory report 2022 (IIR): Submission under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution. Federal Office for the Environment BAFU. Bern

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

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

[9] Bundesamt für Landwirtschaft (2022). AP 22+. https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/agrarpolitik/ap22plus.html. Letzter Zugriff: 17.06.2022.

[10] Agripedia (2022). Absenkpfad Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe (Pa.Iv. 19.475). https://agripedia.ch/focus-ap-pa/de/startseite/absenkpfad-pflanzenschutz-und-naehrstoffe-pa-iv-19-475/. Letzter Zugriff: 17.06.2022.

[11] Schweizer Bauer (2021). Schleppschlauchpflicht auf 2024 verschoben. https://www.schweizerbauer.ch/politik-wirtschaft/agrarpolitik/schleppschlauchpflicht-auf-2024-verschoben/. Letzter Zugriff: 17.06.2022.

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

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

grossen Unterschieden zwischen den geltenden Grundlagen und heutiger Praxis.[14] [15] Auch wurde aus Forschungskreisen bemängelt, dass organischer Stickstoff, z. B. in Form von Gülle, nur teilweise angerechnet wird. Vom gesamten Anfall von Stickstoff fliesst nur ca. die Hälfte (45 % für Ackerbau und 55 % für Futterbau) in die Bilanz mit ein. Dieser "verfügbare Stickstoff" kann im Jahr der Ausbringung von den Pflanzen aufgenommen werden. Der Rest wird als Verlust betrachtet oder zu einem späteren Zeitpunkt im Boden mineralisiert. Allerdings taucht der Anteil an mineralisiertem Stickstoff in den Folgejahren nicht mehr in der Bilanz auf.[16] Weiter richten sich die in der Suisse-Bilanz verwendeten Richtwerte nur nach dem Pflanzenbedarf und dem betrieblichen Bewirtschaftungspotential. Langfristige Umweltwirkungen fliessen nicht in die Berechnungen mit ein.[17]

Der Eintrag von Stickstoff durch Ammoniakemissionen in die Umwelt ist aber gross und die Umweltwirkungen beträchtlich. Eine Studie im Auftrag des BAFU zeigte, dass diese Stickstoffeinträge in naturnahe Wiesen, Wälder und Moore der Schweiz vielerorts zu hoch sind.[18] Bei mehr als 90 % der Waldökosysteme und bei rund 70 % der (halb)natürlichen Ökosysteme wurden im Jahr 2010 die Critical Loads für Stickstoff überschritten.[19] Der gesamtschweizerische Ammoniak-Immissionsmessbericht kommt weiter zum Schluss, dass die Ammoniakkonzentrationen seit dem Jahr 2000 weder zu- noch abgenommen haben (Abbildung 2).[20]

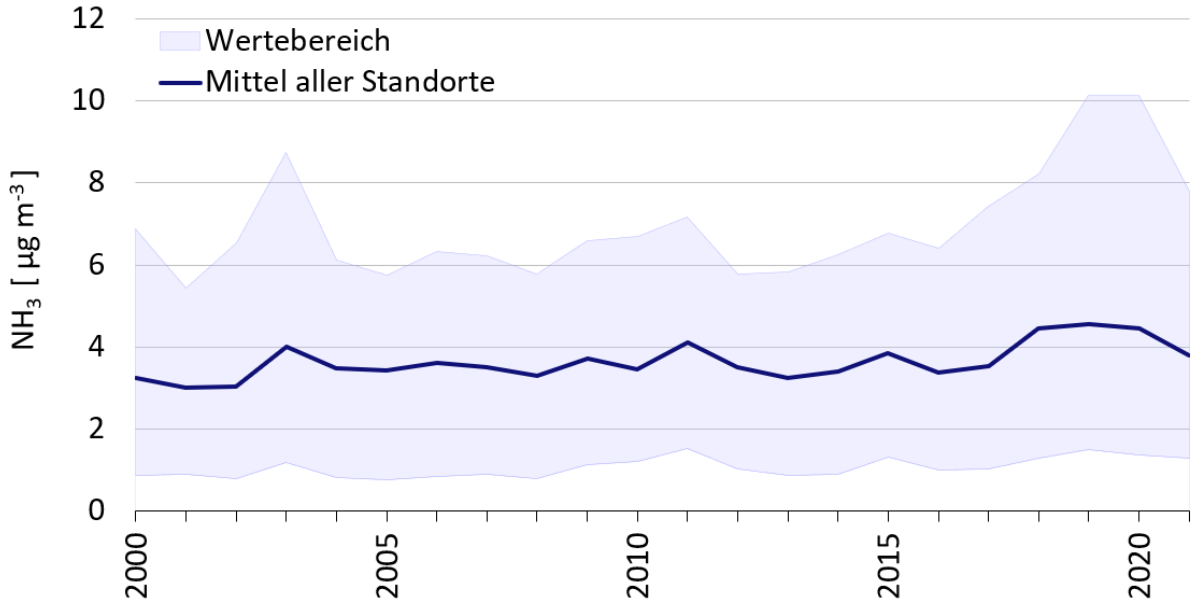


Abbildung 2: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen von 13 Immissions-Messstandorten in der Schweiz, an denen seit 2000 durchgehend gemessen wird.

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

[15] Schweizer Bauer (2022). Suisse-Bilanz: Anpassung und keine Toleranzgrenze. https://www.schweizerbauer.ch/politik-wirtschaft/agrarpolitik/suisse-bilanz-anpassung-und-keine-toleranzgrenze/. Letzer Zugriff: 17.06.2022.

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

[17] Wey, H. (2022). Nitrate leaching under arable land: monitrong, mitigation measures and memory effects. Dissertation. Universität Neuchâtel.

[18] Seitler, E. et al. (2016): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB–Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 105 S.

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

[20] Seitler, E. und Meier, M.(2021). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2020. Messbericht.

1.1 Landwirtschaft in der Zentralschweiz

Die topografischen Bedingungen in der Zentralschweiz führen zu einem vergleichsweise hohen Anteil an Grasland und Weiden in der landwirtschaftlichen Nutzung. Einzig die Kantone Zug und Luzern zeigen bedeutende Anteile an Ackerland (Abbildungen 3 und 4). Auf den Kunst- oder Naturwiesen mit 50–70 % Gräsern, 10–30 % Leguminosen und 10–30 % Kräutern wächst qualitativ hochwertiges Futter für das Vieh.

Diese Wiesen werden in der (Zentral-)Schweiz vor allem mit dem anfallenden Hofdünger wie Gülle gedüngt, und zwar nach jedem Schnitt. Die erste Gabe (Andüngung) im Frühling erfolgt ebenfalls mit Gülle oder mit Kunstdünger, welcher einen hohen Anteil an schnell verfügbarem Stickstoff enthält. Je nach Höhenlage und Nutzungsintensität folgen 2-4 Stickstoffgaben zwischen ca. Mai und November.[21]

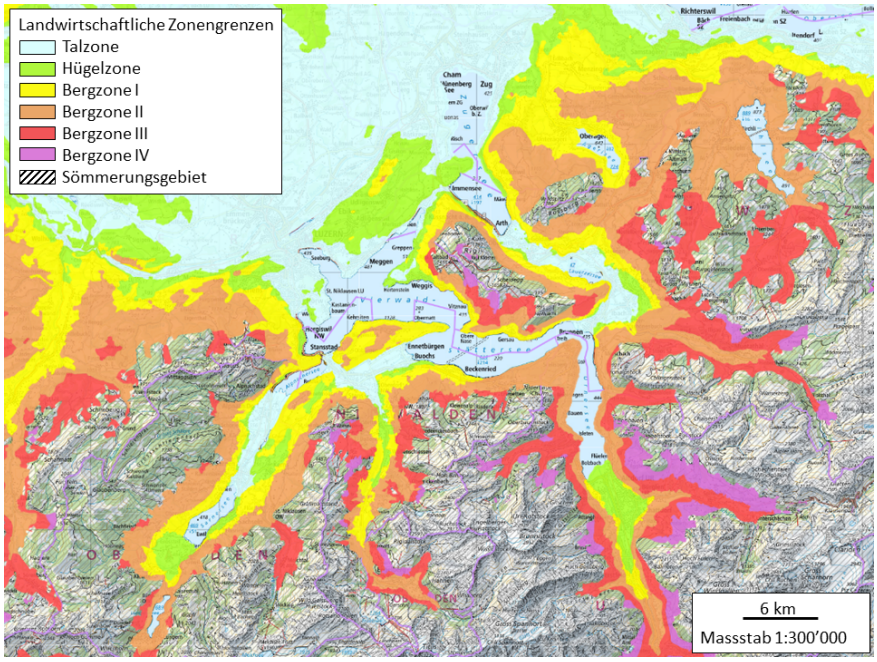


Abbildung 3: Landwirtschaftszonen in der Zentralschweiz. Im Unterschied zum Mittelland ist viel Fläche als Hügel- und Bergzone klassifiziert, welches von grosser Bedeutung für die landwirtschaftliche Nutzung ist.[22]

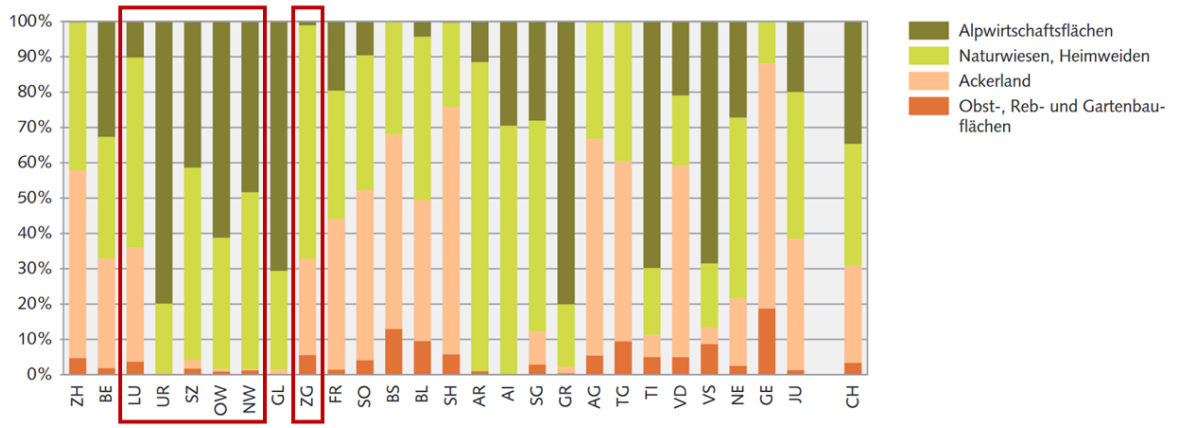


Abbildung 4: Landwirtschaftliche Nutzung in den verschiedenen Kantonen der Schweiz. Rot markiert sind die Kantone der Zentralschweiz, welche in diesem Bericht behandelt werden.[23]

[21] Huguenin-Elie, O., Mosimann, E., Schlegel, P., Lüscher, A., Kessler, W., Jeangros, B. (2017). Düngung von Grasland. Kapitel 9 in: Richner, W., Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8(6).
[22] Swisstopo (2022). Landwirtschaftliche Zonengrenzen. Letzter Zugriff: 11.07.2022.
[23] Bundesamt für Statistik (2015). Die Bodennutzung in der Schweiz. Auswertungen und Analysen. 02 Raum und Umwelt, 002-0905. Neuchâtel.

1.2 Richtwerte und Beurteilung

Zur Beurteilung der Stickstoffeinträge stehen Critical Loads und Critical Levels der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)[24] zur Verfügung. 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

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 NH_3 m^{-3} für empfindliche Moose und Flechten sowie die damit assoziierten Ökosysteme
- 3 µg NH_3 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.[25] 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 ausschliesslich anhand der Ammoniak-Konzentrationen ergibt.
- „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 sollen aber auch im Bedarfsfall die Critical Levels für Ammoniak herangezogen werden. Die Einhaltung des Critical Levels für Ammoniak allein löst das Problem der zu hohen Stickstoffeinträge noch nicht.
- Entscheidend zur 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 Belastung.
- 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.

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

[25] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (2014). Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Bern

1.3 Übersicht Messungen in der Zentralschweiz

In allen Messnetzen sind jeweils an jedem Messpunkt zwei oder drei Passivsammlerröhrchen in einem Wetterschutzgehäuse montiert (Abbildung 5). Alle Messpunkte sind im Anhang im Detail charakterisiert.

Seit dem Jahr 2012 erfolgt die Berichterstattung über die Ammoniakmessungen durch die Firma inNET Monitoring AG. Der Ammoniak-Messbericht 2012 wurde im Auftrag der Dienststelle Umwelt und Energie des Kantons Luzern erstellt.[26] In den Folgejahren wurden gemeinsame Ammoniak-Messberichte für die Zentralschweiz verfasst.[27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Im vorliegenden Bericht werden im Auftrag Umwelt Zentralschweiz (UZ, vorgängig ZENTRUM bzw. ZUDK) die Ammoniak-Messdaten der gesamten Zentralschweiz bis Ende 2021 im Rahmen das Basisleistungsauftrag (BLA) inLUFT ausgewertet.

Im Kanton Luzern sind insgesamt sechs Messgebiete vorhanden. In jedem Messgebiet gibt es mehrere Messpunkte (Abbildung 6). Nachfolgend werden die Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit (z. B. Messgebiet Wauwil) benannt, z. T. wird «Kanton Luzern» hinzugefügt.

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 Uri). Meist wird auf das «Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz» verwiesen.

Zusätzlich betreibt der Kanton Zug seit 2007 ein kantonales Ammoniakmessnetz mit vier Messgebieten (Abbildung 6). Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit benannt (z. B. Messgebiet/Messpunkt Zugerberg), meist wird auf «kantonale Passivsammler im Kanton Zug» hingewiesen.

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 1.4).

[26] Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2012). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen Kanton Luzern 2000 bis 2011. inNET Monitoring AG.
[27] Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2013). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2012. inNET Monitoring AG.
[28] Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2014). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2013. inNET Monitoring AG.
[29] Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2016). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2015. inNET Monitoring AG.
[30] Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2017). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2016. inNET Monitoring AG.
[31] Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2018). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2017. inNET Monitoring AG.
[32] Wey, H., Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2019). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2018. inNET Monitoring AG.
[33] Wey, H., Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2020). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2019. inNET Monitoring AG.
[34] Wey, H., Ruckstuhl, C. (2021). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2020. inNET Monitoring AG.

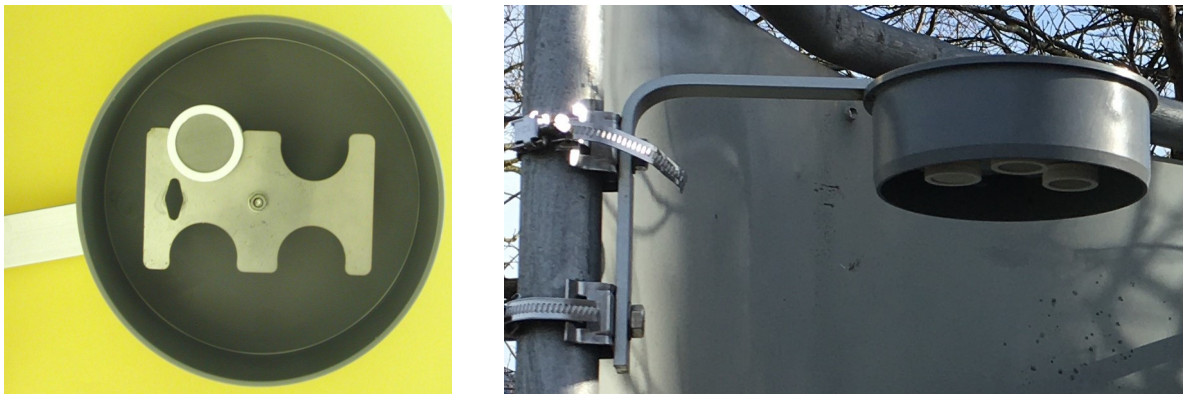


Abbildung 5: Ein Ferm-Passivsammler im Einsatz.[35] Pro Messpunkt werden immer mindestens zwei Messungen durchgeführt und gemittelt, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

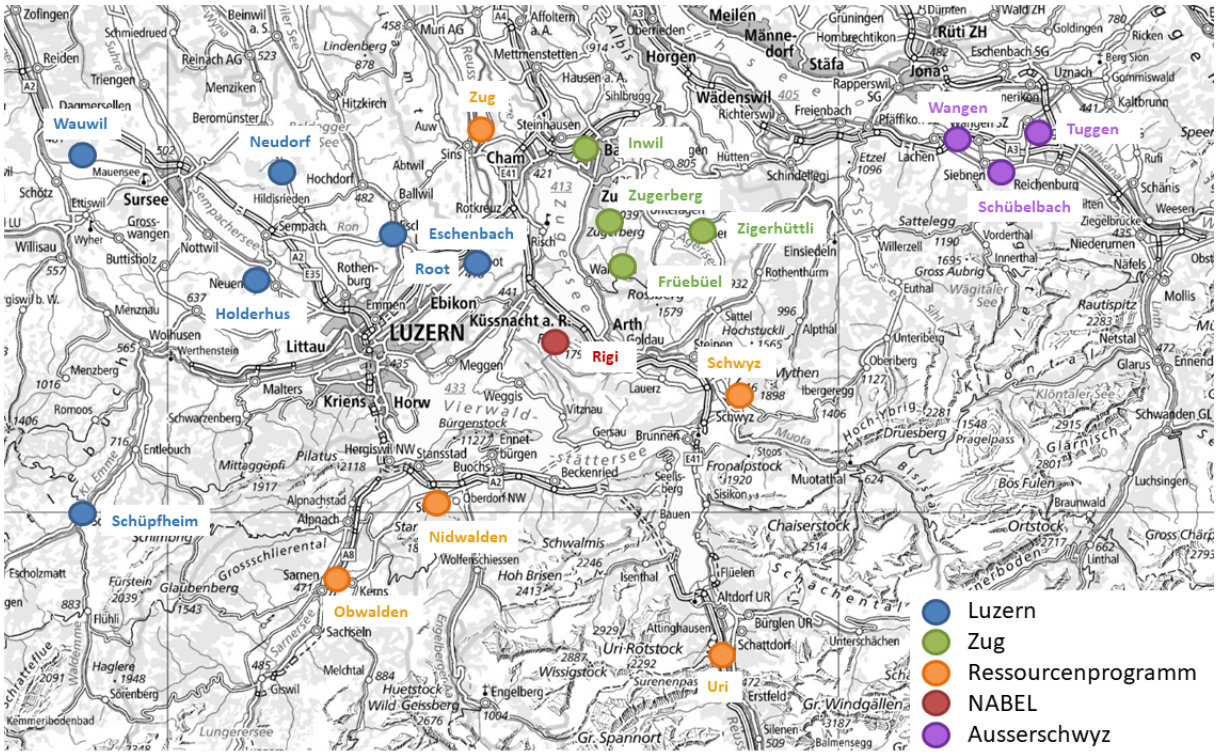


Abbildung 6: Gesamtübersicht der Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz: Die Punkte stehen entweder für Messgebiete, in welchen in der Regel mehrere Messpunkte vorhanden sind, oder für einzelne Messpunkte.

[35] Fotos von E. Seitler, FUB

1.4 Messperioden aller Messpunkte

Abbildung 7 zeigt eine graphische Darstellung der Messperioden für alle Messpunkte in der Zentralschweiz, inklusive der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp. Die ersten Messungen begannen 1999 in den Gebieten Wauwil, Holderhus, Schüpfheim sowie auf dem Zugerberg und der Rigi-Seebodenalp. Ab 2004 wurden im Kanton Luzern verschiedene Messkampagnen durchgeführt (z. B. Ost-West-Transekt, Höhenprofile), wodurch 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. In diesen fünf Kantonen bestanden Ende 2016 nebst der Rigi-Seebodenalp 20 Ammoniakmesspunkte.

SCHÜ00-03: Verschiebungen
Wie in Abbildung 7 dargestellt, wurde der Messpunkt SCHÜ00 während der Messphase verschoben. Dieser Messpunkt wurde mit der Zeit von Gebüsch überwachsen und deshalb wieder auf freies Feld umplatziert. Da die räumliche Verschiebung nur einige Meter betrug, wurden keine Parallelmessungen durchgeführt. Folglich können und müssen die Messwerte vor der Verschiebung nicht korrigiert werden. Der Messpunkt SCHÜ01 wurde im Juni 2016 demontiert und dafür der Messpunkt SCHÜ03 in Betrieb genommen.

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

HOL: Verschiebungen
Der Messpunkt HOL01 wurde im Mai 2007 am gleichen Ort wie HOL00 installiert, aber auf einer Höhe von 4 m über Grund. Vom 23.05.2007 bis am 08.01.2009 wurde die Konzentration auf beiden Höhen gemessen und eine 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 am 10.01.2008 war am Messpunkt ZB00 nur ein Passivsammler, auf 1.3 m über Grund exponiert, in Betrieb. Vom 28.02.2008 bis am 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. [36]

ZG01: Datenqualität
Der Passivsammler beim Messpunkt ZG-01 wurde ab September 2013 mehrmals von Vandalen beschädigt: Der Probebehälter mit Stange und auch die Passivsammler wurden entwendet. Deshalb steht für diesen Messpunkt für das Jahr 2013 kein gültiger Jahresmittelwert zur Verfügung. Auch im Jahr 2014 gingen die Vandalenangriffe weiter, worauf der Kanton Zug diverse Massnahmen ergriffen hat (Erstattung Anzeige, 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 SZ-02 aufgegeben und SZ-03 wegen wiederholtem Vandalismus verschoben (SZ-03a). Der Mittelwert dieses Messgebiets ab 2020 besteht deshalb aus den Messwerten von SZ-01 und SZ-03a.

SZ aussen: neues Messgebiet
Die zusätzlichen Messpunkte im Kanton Schwyz bei Tuggen und Schübelbach sind seit 2019 in Betrieb. Bei Wangen wird seit 2014 mit Unterbruch im Jahre 2018 gemessen. WAN01 und SCHUB01 wurden im Frühjahr 2021 verschoben (WAN01a und SCHUB01a), da die Wechselperson durch weidende Kühe und Stiere gefährdet war. Für diese Stationen existieren daher im Jahr 2021 keine gültigen Jahresmittelwerte. Es wurde jedoch, als Pendant zum Messgebiet Innerschwyz, ein neues Messgebiet "Ausserschwyz" vorbereitet.

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

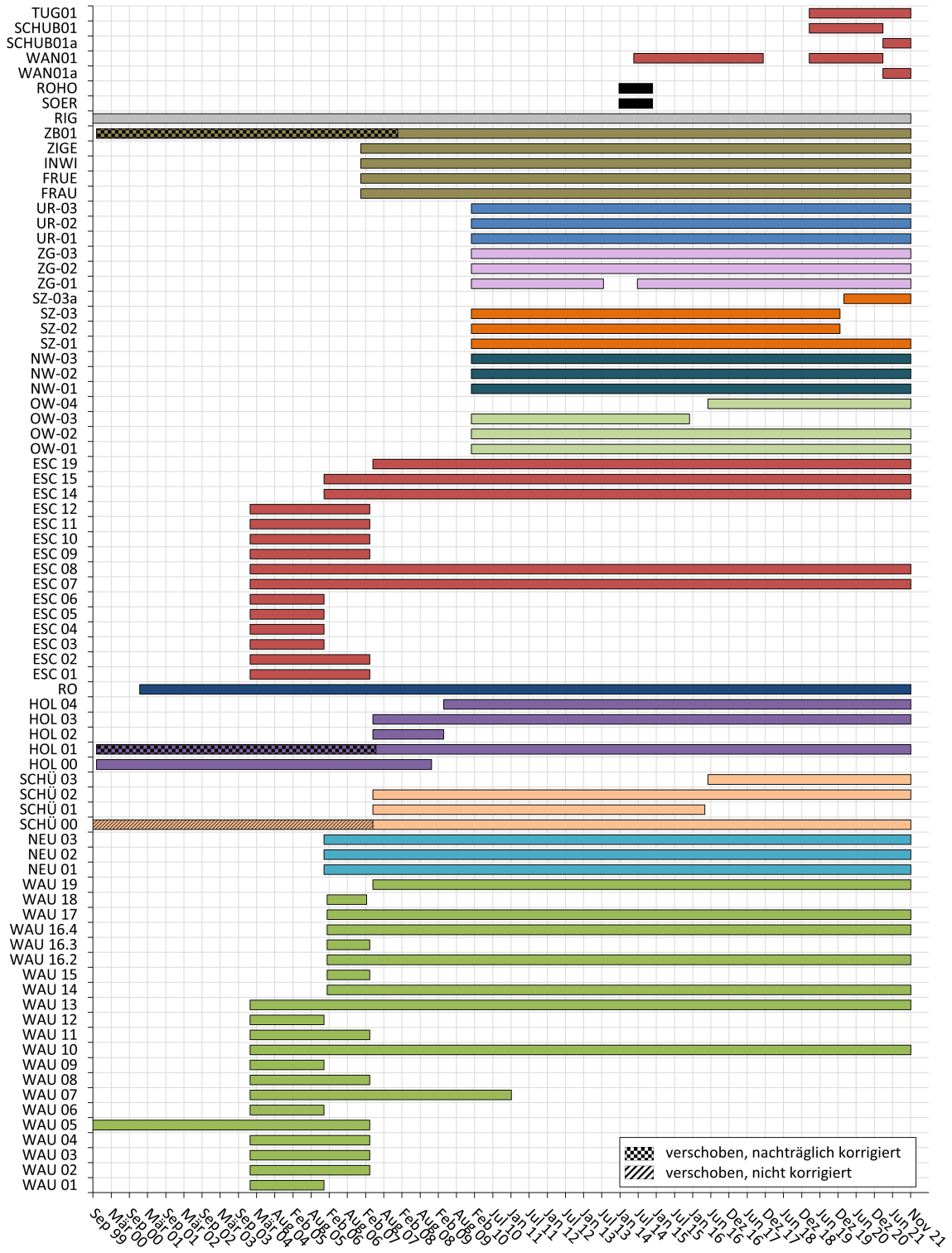


Abbildung 7: Zeitliche Übersichtsgrafik aller Messpunkte in der Zentralschweiz, farblich unterteilt in die verschiedenen Messgebiete.). [37]

[37] Die Umrechnung für die HOL01-Werte vor 2007 wurde durch eine Parallelmessung mit HOL00 ermittelt: HOL01 = HOL00*0.98+0.90 (R2=0.95). Die Umrechnung für die ZB01-Werte vor 2008 wurde durch eine Parallelmessung mit ZB00 ermittelt: ZB01 = ZB00 * 1.05 (R2 = 0.97)

1.5 Messunsicherheit der Passivsammler

Die Messung der Ammoniakkonzentration erfolgte in früheren Berichten über Radiello-Sammler, seit dem Jahreswechsel 2018/2019 mittels Ferm-Passivsammlern. Ein Vergleich zwischen den beiden Messmethoden ist in Seitler, E. & Meier, M. (2020) ersichtlich.[38] Die Vergleichsmessungen zeigen, dass die beiden Methoden sehr gut übereinstimmen. Die Sammler werden von der Forschungsstelle für Umweltbeobachtung (FUB) analysiert.

Um die Messresultate genauer interpretieren zu können ist es von Nutzen, Kenntnis über die Messunsicherheiten zu haben. Eine gängige Grösse zur Abschätzung der Messunsicherheit ist die „erweiterte Messunsicherheit". Diese ergibt sich aus der Standardmessunsicherheit, multipliziert mit dem Erweiterungsfaktor k = 2. Sie entspricht bei einer Normalverteilung der Abweichungen vom Messwert einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 %. In Vergleichsmessungen mit anderen Messsystemen wurde für die früher verwendete Methode, die Radiello-Passivsammler, eine erweiterte Messunsicherheit von 0.6 µg m^{-3} im Jahresmittel ermittelt. [39] Wird mit zwei bis drei Röhrchen pro Standort gemessen, reduziert sich die Unsicherheit um zirka einen Faktor 1.5.

Ein Vergleich von parallel messenden Passivsammlerröhrchen und zwei Wochen Expositionszeit hat gezeigt, dass 90 % der Datenpaare weniger als 0.9 µg m^{-3} auseinanderliegen.[40] Daraus kann eine Unsicherheit (90 %-Bereich) von 0.17 µg m^{-3} für einen Jahresmittelwert abgeleitet werden.

Für die absoluten Werte kann daher von einer Unsicherheit von etwa 0.4 µg m^{-3} für die Jahresmittel und für die relativen Werte (Änderungen) von weniger als 0.2 µg m^{-3} für die Jahresmittel ausgegangen werden.

[38] Seitler, E. und Meier, M. (2020). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2019. Messbericht. Abbildung 48, Seite 61.
[39] Dämmgen, U., Thöni, L., Lumpp, R., Gilke, K., Seitler, E., Bullinger, M. (2010). Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig. Landbauforschung, Sonderheft 337.
[40] Bucher, P. (2010). Ammoniak-Messbericht. Ammoniak-Messnetz Kanton Luzern, Ergebnisse 2000 bis 2009, uwe Luzern

2 NH_3-Belastung

2.1 Mittlerer Jahresgang

Der mittlere Jahresgang wird hier beispielhaft anhand der Messpunkte von Obwalden und der kantonalen Messpunkte von Zug dargestellt (Abbildung 8). 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 dem vorliegenden Bericht des Jahres 2021 werden die Monatsmittel der letzten fünf Jahre gezeigt, weshalb die Abbildungen nicht mehr direkt mit vorherigen Dokumenten vergleichbar sind.

Für die Interpretation der Daten ist es wichtig anzumerken, dass Emissionen und Immissionen nicht direkt kausal zusammenhängen. Auf Seite der Emissionen gibt es einerseits die ungefähr konstanten Quellen aus Stall und Lagerung, die auch im Winter und in der Nacht emittieren. Das Ausbringen von Gülle und Mist als variable Quellen hingegen findet vor allem tagsüber und während der Vegetationsperiode statt. Bodennah emittiertes Ammoniak hat, je nach Tageszeit und Witterung, einen unterschiedlichen Einfluss auf die Immissionskonzentration in der Umgebung. Beispielsweise können Emissionen während der in der Nacht auftretenden bodennahen Inversionen geringer Mächtigkeit die Konzentrationen in der Umgebung stärker beeinflussen, als durch am Tage emittierte Frachten, die sich durch atmosphärische Turbulenzen rascher verdünnen. Trotz dieser 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 8), aber auch Nidwalden, Wauwil, Zug, Eschenbach, Neudorf und Schüpfheim, zeigen einen ersten Höchstwert im März. Dieser «Peak» ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass es eine gewisse Synchronisation beim Ausbringen von Gülle gibt. In den ersten warmen Tagen zu Beginn der Vegetation wird in der ganzen Zentralschweiz gleichzeitig Gülle ausgebracht, wobei unter «gleichzeitig» hier als «innerhalb der 14-tägigen oder 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. Gleichzeitig waren aber in den letzten fünf Jahren, welche in die Abbildungen des mittleren Jahresganges einfliessen, die Sommertemperaturen hoch, was bei gleichbleibendem Güllemanagement zu mehr atmosphärischen Verlusten geführt haben kann als in kühleren Vorjahren.

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

Die Messpunkte des Kantons Zug in den Messgebieten mit extensiver Weidebewirtschaftung zeigen keinen bis nur einen sehr schwach ausgeprägten Frühjahres- und Herbstpeak, was für diese Hypothesen spricht (Abbildung 8).

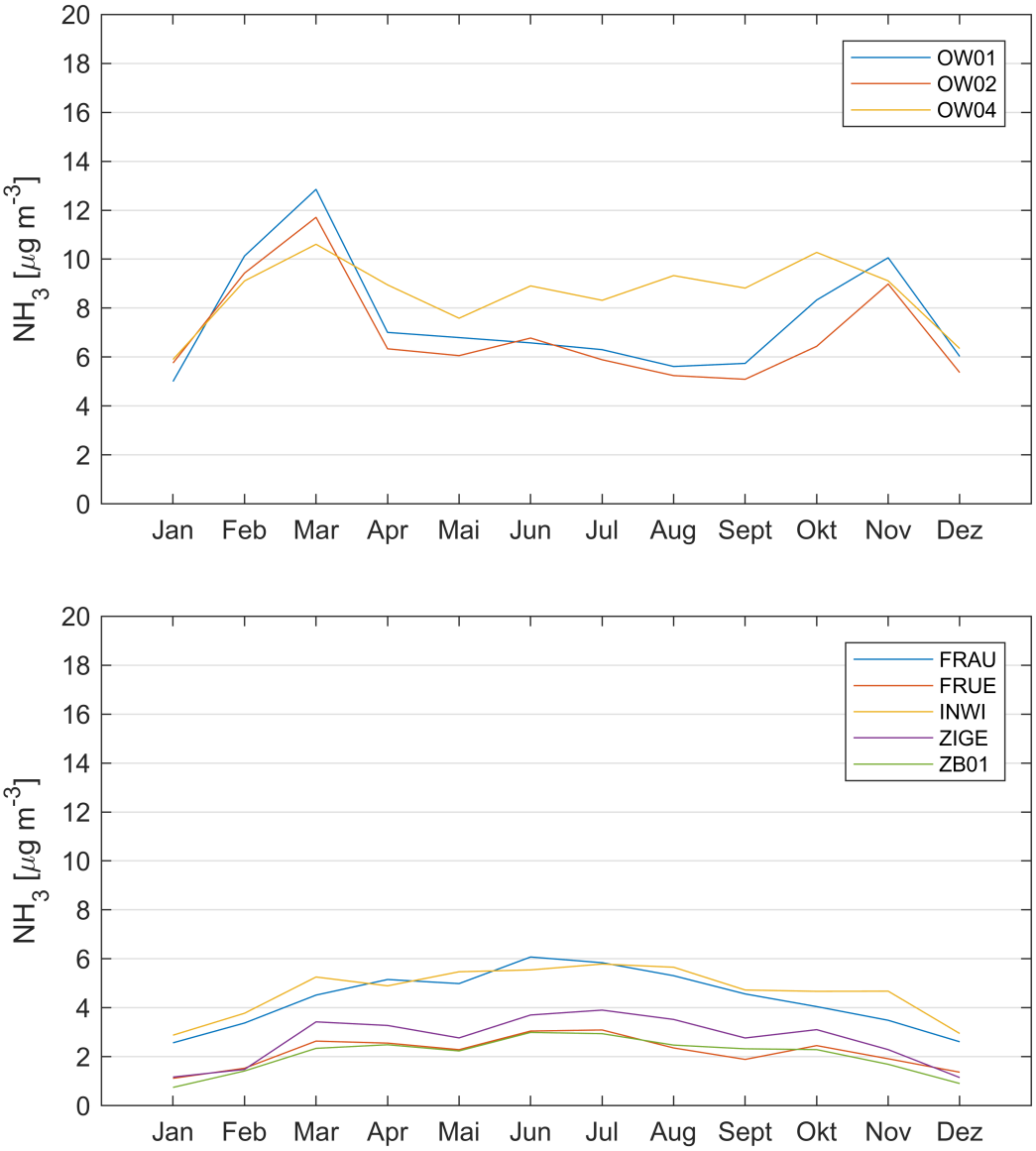


Abbildung 8: Vergleich des Jahresgangs unterschiedlicher Messpunkte mit unterschiedlicher Bewirtschaftung bzw. unterschiedlich intensiver Tierhaltung. Mittelung der letzten fünf Jahre (2017-2021). Oben: Messpunkte von Obwalden. Unten: Messpunkte des Kantons Zug.

2.2 Mehrjahresmittelwerte

Tabelle 1 und Abbildung 9 zeigen die mehrjährigen Jahresmittel inkl. Standardabweichung der Ammoniakkonzentration der verschiedenen Messgebiete. Zusätzlich zu dem Mittelwert seit Messbeginn wird seit dem Bericht 2021 in Tabelle 1 auch noch derjenige der letzten fünf Jahre dargestellt. Die Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen ausgewählter Messpunkte über die jeweilige Messperiode sind auch im Anhang eingefügt.

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

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

Messgebiet	**Mittelwert seit Messbeginn**	**Mittelwert der letzten 5 Jahre**
Wauwil (WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19)	8.0 ± 0.7	8.2 ± 0.6
Eschenbach (ESC07, ESC08, ESC14, ESC15, ESC19)	9.4 ± 1.6	10.7 ± 1.6
Holderhus (HOL01, HOL03, HOL04) [5]	7.7 ± 0.8	8.3 ± 0.8
Schüpfheim (SCHÜ00, SCHÜ02, SCHÜ03) [1]	7.0 ± 0.9	7.5 ± 1.1
Root, Michaelskreuz (RO)	3.3 ± 0.5	3.7 ± 0.6
Neudorf (NEU01, NEU02, NEU03)	5.8 ± 0.7	6.3 ± 0.8
Nidwalden (NW-01, NW-02, NW-03)	6.8 ± 0.6	6.9 ± 0.8
Obwalden (OW-01, OW-02, OW-04) [2]	7.3 ± 0.8	7.7 ± 0.8
Innerschwyz (SZ-01, SZ-02, SZ-03, SZ-03a) [3]	5.0 ± 0.9	4.9 ± 0.5
Ausserschwyz (WAN01/WAN01a, SCHUB01/SCHUB01a, TUG01) [6]	8.5 ± 1.5	8.7 ± 2.0
Uri (UR-01, UR-02, UR-03)	6.4 ± 0.7	6.6 ± 0.7
Zug (ZG-01, ZG-02, ZG-03) [4]	8.6 ± 1.3	9.0 ± 0.9
Kloster Frauental (FRAU)	4.1 ± 0.5	4.4 ± 0.4
Früebüel (FRÜE)	1.8 ± 0.4	2.2 ± 0.4
Inwil (INWI)	4.3 ± 0.6	4.7 ± 0.6
Zigerhüttli (ZIGE)	2.4 ± 0.4	2.7 ± 0.5
Zugerberg 1 (ZB01)	1.8 ± 0.3	2.1 ± 0.2
Rigi-Seebodenalp (RIGI)	1.5 ± 0.2	1.7 ± 0.2

(1) Ab 2016 ist beim Messgebiet Schüpfheim ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (SCHÜ01), da dieser Messpunkt aufgehoben wurde.
(2) Ab 2016 ist beim Messgebieten Obwalden ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (OW-03), da dieser Messpunkt aufgehoben wurden.
(3) Ab 2020 wird die mittlere Konzentration des Messgebiets Innerschwyz aus SZ-01 und neu SZ-03a gebildet, weil die Messpunkte SZ-02 und SZ-03 aufgegeben wurden.
(4) Der Messpunkt ZG-01 wurde in früheren Berichten ausgenommen, seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.
(5) Der Messpunkt HOL04 wurde in früheren Berichten ausgenommen, seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.
(6) In Ausserschwyz ist die Datenlage für eine zuverlässige Berechnung momentan noch ungenügend. Die angegebenen Werte wurden aus Messungen der Jahre 2014-2017 und 2021 (je 1 Messpunkt) und 2019/20 (je 3 Messpunkte) gemacht.

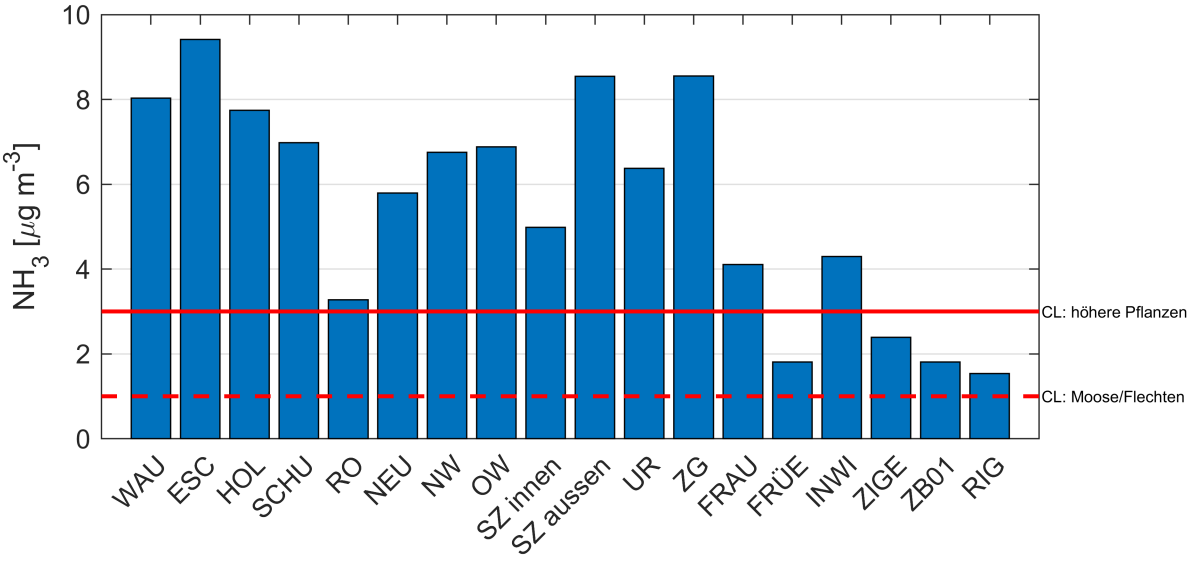


Abbildung 9: Mehrjähriges Mittel (2010 - 2021) der Ammoniakkonzentration in den einzelnen Messgebieten. Die rote ausgezogene Linie kennzeichnet den Critical Level (CL) für höhere Pflanzen, die rote gestrichelte Linie denjenigen für empfindliche Moose und Flechten.

2.3 Verlauf der Ammoniakkonzentration

Werden die Jahresmittel aller Ammoniakmesspunkte seit 2007 im Kanton Zug dargestellt, so wird deutlich, dass die Critical Levels über alle Messjahre an den meisten Messpunkten überschritten werden (Abbildung 10). Die drei kantonalen Messpunkte Früebüel, Zugerberg und Zigerhüttli (FRÜE, ZB01 und ZIGE) sind in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen, weshalb dort der strengere Critial Level-Wert für Moose und Flechten von 1 µg NH_3 m^{-3} angewendet werden soll. Dieser wird an all diesen drei Messpunkten und in allen Jahren überschritten.

Im Jahr 2021 wurden an allen Zuger Messpunkten tiefere Ammoniakkonzentrationen als in den drei Vorjahren gemessen. Die Werte 2021 liegen zu einem Grossteil im oberen Messbereich der Jahre vor 2018, mit Ausnahme der Messwerte des Ressourcenprojekts: Bei ZG-01 wurde der tiefste Messwert seit Messbeginn registriert, bei ZG-02 der zweittiefste. Bei ZG-03 hingegen ist die Ammoniakonzentration 2021, abgesehen derjenigen aus den Jahren 2018–2020, die zweithöchste seit Messbeginn. Dieses Messgebiet weist also eine sehr hohe Variabilität auf, was wegen der geografischen Nähe der Messpunkte erstaunlich ist.

An den meisten Messpunkten wurde im Jahr 2013 die niedrigste Ammoniakkonzentration seit Messbeginn gemessen. Dabei wurden in jenem Jahr hauptsächlich tiefe Frühjahres- und Sommermittelwerte registriert, welche meteorologisch auf den langen Winter und die nassen Bedingungen zurückzuführen waren. Jedoch war auch das Jahr 2021 eher kühl und sehr nass, was nicht in gleichem Masse wie 2013 in den Ammoniakkonzentrationen reflektiert wird. Im Gegensatz dazu waren die Jahre 2018, 2019 und 2020 geprägt von langen, trockenen Sommer mit mehreren Hitzewellen. Dieser Umstand kann die hohen Ammoniakimmissionswerte in diesen Jahren erklären. Auf den Einfluss der Witterung auf die Ammoniakkonzentration wird im Kapitel 3 näher eingegangen.

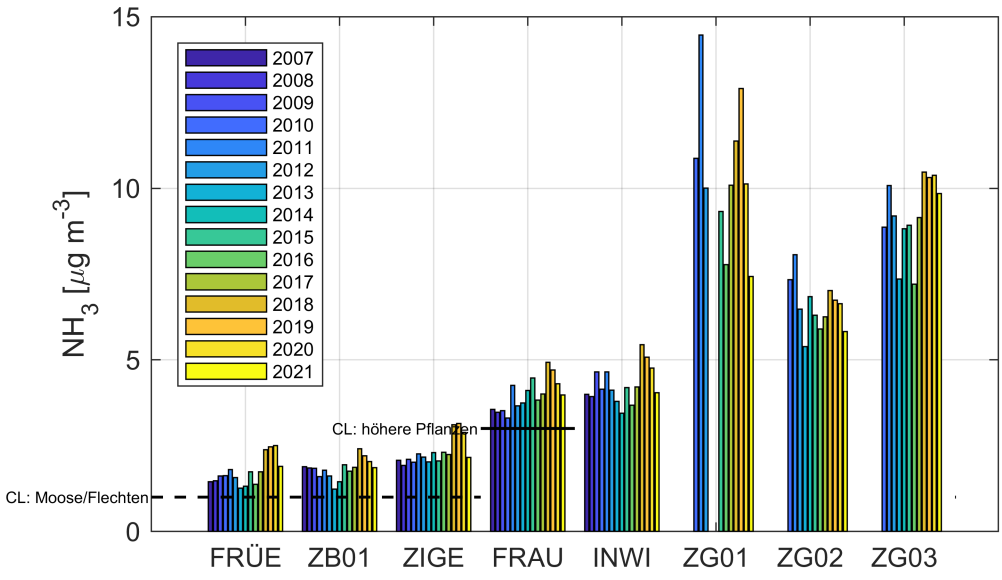


Abbildung 10: Jahresmittel (2007 bis 2021) der Ammoniakkonzentration an den einzelnen Messpunkten im Kanton Zug. Dies beinhaltet sowohl die kantonalen Messpunkte (FRÜE, ZB01, ZIGE, FRAU, INWI), wie auch diejenigen des Ressourcenprojekts (ZG-01, ZG-02, ZG-03). Für ZG-01 konnten aufgrund von Datenlücken keine gültigen Jahresmittel für 2013 und 2014 berechnet werden. Die schwarze ausgezogene Linie kennzeichnet den Critical Level (CL) für höhere Pflanzen, die schwarze gestrichelte Linie den Critical Level (CL) für empfindliche Moose und Flechten.

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 in den Messgebieten des Ressourcenprojekts der Zentralschweizer Kantone (ohne Messgebiete des Kantons Luzern) ist in Abbildung 11 dargestellt. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 eingeflossen.[41]

Wie in Kapitel 2.1 schon diskutiert wurde, sind vor allem in früheren Messjahren alljährlich zwei Peaks, nämlich je im März und Oktober, zu erkennen. Im Jahresverlauf stechen die Jahre 2016-2018 bezüglich dieser Peaks nicht speziell hervor: Diese sind weniger ausgeprägt als in gewissen Vorjahren. Jedoch ist das Konzentrationsniveau über das ganze Jahr hinweg angehoben. Zwischen den beiden typischen Peaks sinkt die Konzentration nur wenig und es sind teilweise weitere Peaks erkennbar. Pendelten die Ammoniakkonzentrationen während der Sommermonate im Jahr 2017 um 6 µg m^{-3}, ist dieser Wert 2018 über alle Messgebiete mit etwa 8 µg m^{-3} deutlich höher.

In den Jahren 2019 und 2020 ist das frühere Muster wieder erkennbar. Der Frühjahrspeak ist dabei an allen Standorten wieder deutlich ausgeprägter als in den Vorjahren. Danach sinkt die Konzentration wieder, bis ein Sommerpeak sichtbar wird, welcher in Vorjahren je nach Messgebiet wegen dem allgemeinen hohen Konzentrationsniveau gar nicht bis nur schwach sichtbar war. Der Herbstpeak ist bezüglich Timing und Amplitude vergleichbar mit den Vorjahren. Sowohl 2019 als auch 2020 stechen die Frühjahrespeaks in Zug ins Auge. Diese hohen Werte werden von Messpunkt ZG-01 verursacht. 2021 ist das Phänomen nicht mehr in diesem Ausmasse zu sehen. Dafür ist der zweite Peak im Messgebiet Zug deutlich vorgelagert: Er tritt bereits im Juli auf anstatt, wie in den anderen Messgebieten, im Oktober. Diesmal ist es vor allem der Messpunkt ZG-03, welcher diesen Sommerpeak verursacht.

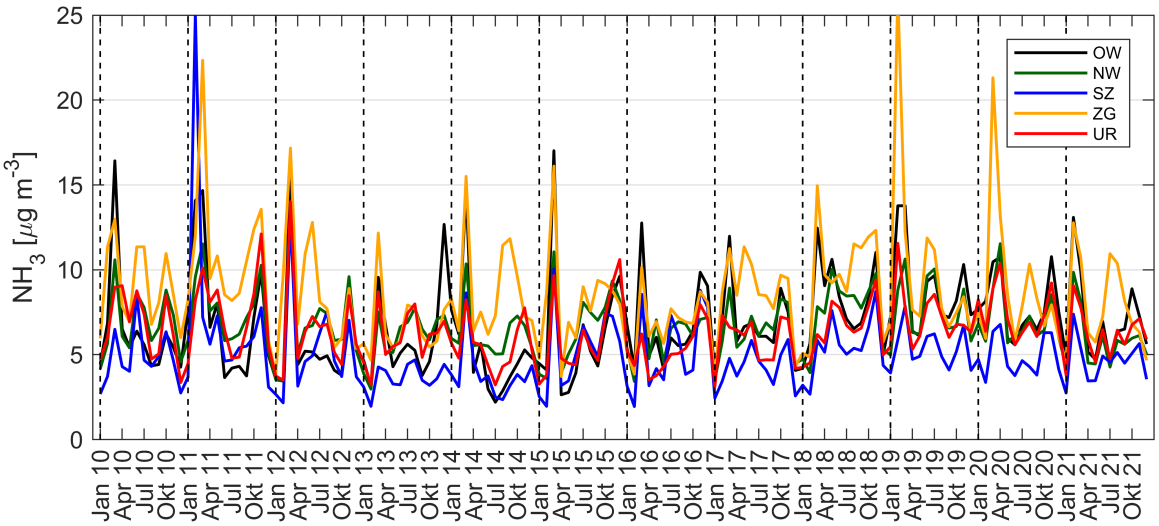


Abbildung 11: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne Luzern.

[41] Der Messpunkt ZG-01 wurde in früheren Berichten aus unbekannten Gründen ausgelassen, seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration im Kanton Zug seit 2010 ist in Abbildung 12 dargestellt. Wie bereits in den Vorjahren können die Messstandorte in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Hohe Belastung: Passivsammler des Ressourcenprojekts (ZG). Der Verlauf der Ammoniakkonzentration ist mit denjenigen der übrigen Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweiz in Abbildung 11 vergleichbar. All diese Standorte liegen in Landwirtschaftsgebieten. Die Frühlingspeaks 2019 und 2020 sind extrem ausgeprägt sichtbar. Danach sinkt die Belastung im Gegensatz zu 2017/2018 aber wieder. Es folgt ein Peak im Sommer. Die leichte Erhöhung im Herbst, welche in den vorhergehenden Jahren sichtbar war, tritt nicht oder evtl. verspätet auf.
- Mittlere Belastung: Die Messungen in Inwil (INWI) und Frauental (FRAU) weisen eine mittlere Ammoniakbelastung auf. Beide Standorte zeigen 2021 einen leicht ausgeprägten Peak im Frühling, gefolgt von einem Sommer- und Herbstpeak.
- Tiefe Belastung: Die Messungen in Früebüel (FRÜE), Zigerhüttli (ZIGE) und Zugerberg (ZB01) wurden bewusst in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen und Gegenden mit geringer Belastung durchgeführt. Auch diese drei Standorte fielen 2020 durch einen deutlich sichtbaren Konzentrationsanstieg im Frühling anstatt Sommer auf, was 2021 nicht bestätigt werden kann.

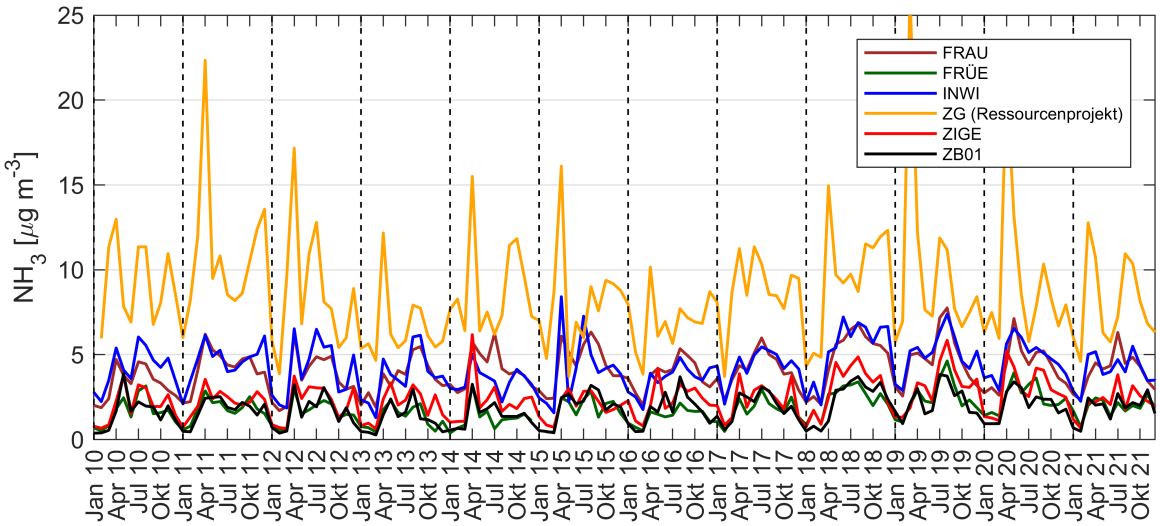


Abbildung 12: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den verschiedenen kantonalen Passivsammler-Standorten in Zug sowie den Zuger Ressourcenprojekt-Standorten (ZG).

Abbildung 13 zeigt schliesslich den Verlauf der Ammoniakkonzentrationen seit Januar 2010 für die Luzerner Messgebiete. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 eingeflossen.

Im Verlauf der Ammoniakkonzentration 2021 ist der Frühlingspeak gut zu erkennen. Wie schon im Vorjahr ist der Sommerpeak im Gegensatz zu vorhergehenden Jahren jedoch schwächer ausgeprägt. Der dritte Anstieg ist in mehreren Messgebieten deutlich früher als in Vorjahren.

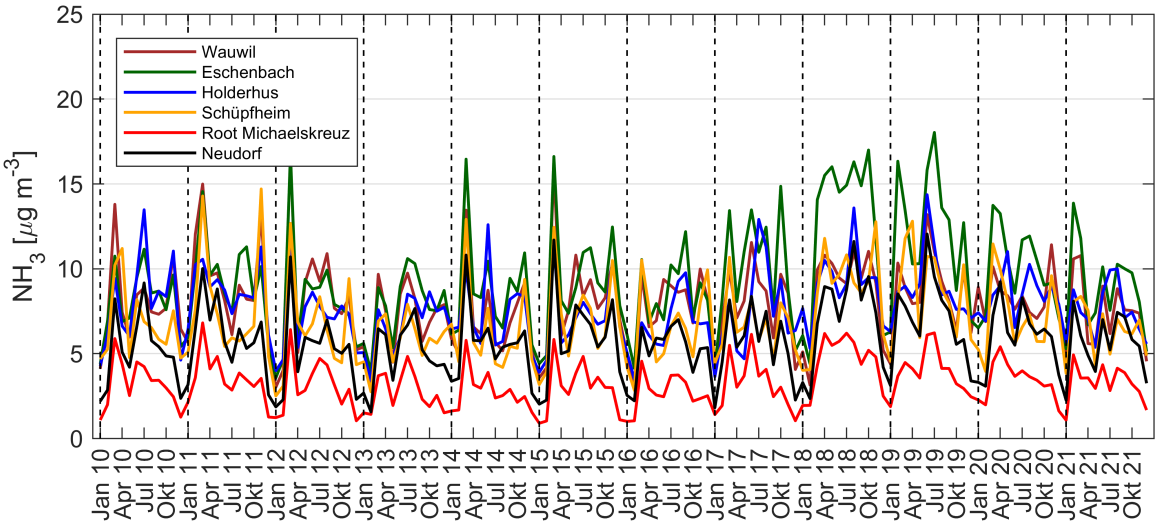


Abbildung 13: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010, gemittelt für jedes Messgebiet im Kanton Luzern.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen der Verläufe der Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2021 festgehalten werden:

- Die Ammoniakkonzentrationen 2021 sind im Vergleich mit den drei sehr warmen Vorjahren (2018–2020) wieder deutlich tiefer, jedoch immer noch auf hohem Gesamtniveau.
- Der Frühjahrespeak ist gut sichtbar. Danach sinken die Konzentrationen im Gegensatz zu den vorhergehenden Jahren wieder, wobei der Sommerpeak jedoch meist schwach ausgeprägt ist. Der Peak im Herbst ist, je nach Messpunkt, unterschiedlich ausgeprägt. Teilweise ist er mehrere Wochen früher als in Vorjahren sichtbar.
- Insbesondere Messpunkte in stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten zeigen mindestens einen Peak (Februar), teilweise einen zweiten während der Sommermonate, und einen dritten Anstieg im Oktober.

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 Ammoniakbelastung am Standort beitragen. Wie bereits in den Vorjahresberichten sind hier exemplarisch zwei Messgebiete abgebildet: Das Messgebiet Zug (Mittelung über die Messpunkte gemäss Tabelle 1) und der Messpunkt Zugerberg. Um einen Eindruck der Variabilität zu bekommen, werden jeweils die Jahre 2011, 2013, 2018, 2020 und 2021 dargestellt (Abbildung 14).

Im Messgebiet Zug sind die von Jahr zu Jahr variierenden Ammoniakbelastungen deutlich erkennbar (Abbildung 14). In allen gezeigten Jahren wurde ein ausgeprägter erster Peak der Ammoniakkonzentration im Monat März bzw. im Jahr 2021 bereits im Februar gemessen. Danach nahm die Konzentration im Jahre 2021 in den folgenden Wochen aber wieder ab, worauf sich im Juli ein weiterer leichter Peak zeigt. Ein deutlicher Herbstpeak 2021 ist im Messgebiet Zug nicht zu sehen, ganz im Gegensatz zu den Jahren 2011 und 2019. Die Konzentrationen nehmen schliesslich mit Einbruch des Winters ab. Die monatlichen und jährlichen Unterschiede können qualitativ mit den meteorologischen Gegebenheiten erklärt werden.

Als Vergleich ist in Abbildung 14 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 respektive Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung sind in den Kapiteln 2.1 und 3.4 festgehalten.

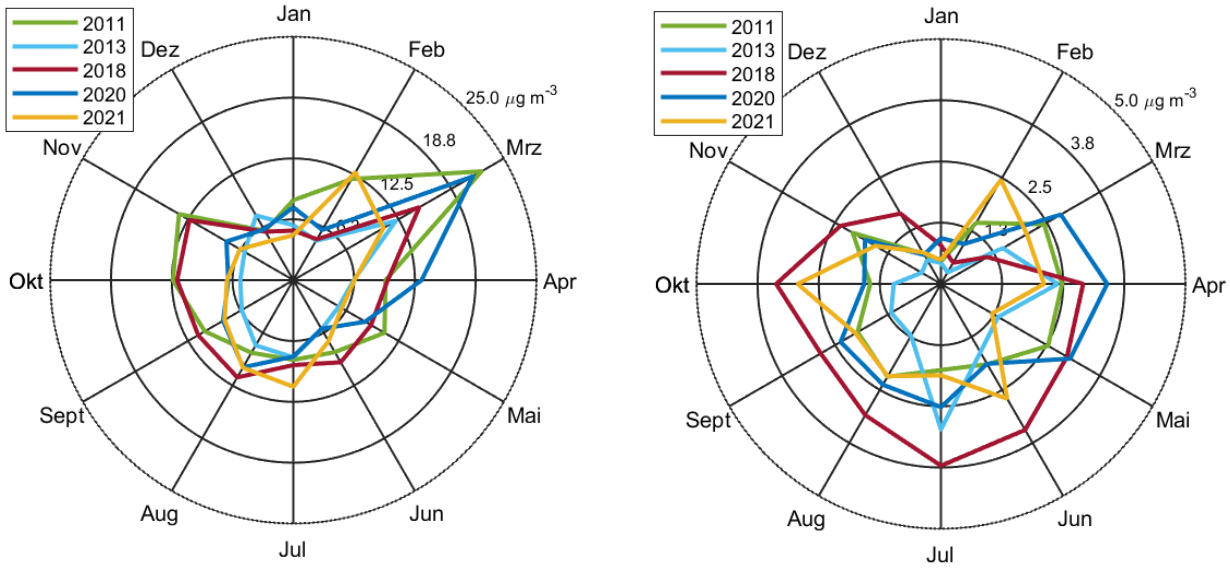


Abbildung 14: Darstellung der Monatsmittelwerte in Netzdiagrammen für das Messgebiet Zug (links mit Radius 25 µg m^{-3}) und den Messpunkt Zugerberg (rechts mit Radius 5 µg m^{-3}) für die Jahre 2011, 2013, 2018, 2020 und 2021. Die Zuger Rose weicht von früheren Versionen ab, da neu auch der Messpunkt ZG-01 miteinberechnet wurde, wo 2013/2014 Vandalenakte die Messung verunmöglich hatten.

3 Trendanalyse

3.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

Für die folgenden Grafiken (Abbildungen 15 bis 19) wurden die Jahresmittelwerte der verschiedenen Messpunkte ab dem Jahr 2007 gemittelt. Dabei flossen nur Messstationen mit ein, welche zwischen Messstart (2007 oder 2010) und 2021 höchstens drei Lücken in den Jahresmesswerten aufweisen. Die verwendeten Stationen sind in der Bildlegende aufgeführt. Anschliessend wurden je drei lineare Trends für das jeweilige Messgebiet berechnet, und zwar für die ganze Messperiode (”Trend”, langfristig), für die letzten 10 Jahre (”Trend_10”, mittelfristig) und zusätzlich für die letzten fünf Jahre (”Trend_5”, kurzfristig). Die Trends sind als Änderung in µg m^{-3} pro Jahr angegeben. Zusätzlich wird das 95-%-Vertrauensintervall in eckigen Klammern aufgelistet.[42] Exemplarisch sind hier, wie in den Vorjahresberichten, vier Messgebiete abgebildet. Die restlichen Grafiken sind im Anhang eingefügt.

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

- Das Messgebiet Wauwil zeigt über die mehrjährige Messperiode schwankende Ammoniakkonzentration mit einem leicht positiven, nicht-signifikanten langfristigen Trend (Abbildung 15). Nach einem Rückgang zwischen 2011 und 2013 stiegen die Werte bis 2018 wieder deutlich und verharrte bis 2020 auf diesem Niveau. Der Messwert 2021 ist deutlich tiefer als im Vorjahr und damit vergleichbar mit 2013/14. Dieser letzte Messwert führt zu einem negativen, jedoch ebenfalls statistisch nicht-signifikanten kurzfristigen Trend.
- In den Messgebieten Neudorf (Abbildung 16) und Eschenbach (Abbildung 17) zeichnen sich ähnliche Konzentrationsverläufe ab, wobei der langfristige positive Trend hier jeweils signifikant ist. 2020 lagen die Messwerte jeweils leicht tiefer als 2018 und 2019. 2021 liegen die Messwerte wieder auf dem Niveau von vor 2018.
- Das Messgebiet Nidwalden zeigt mit einem neutralen langfristigen Trend keine Abnahme der Ammoniakkonzentration (Abbildung 18). Auch hier liegt der Messwert 2021 deutlich tiefer als im Vorjahr.
- Die im Messgebiet Uri gemessene Ammoniakkonzentration sank bis 2016 mit statistischer Signifikanz, stieg dann aber in den folgenden Jahren deutlich an (Abbildung 19). Die im Jahr 2020 gemessene Konzentration war, im Gegensatz zu allen anderen Messgebieten, nochmals etwas höher als in den zwei vorhergehenden Jahren und damit auf ähnlichem Höchstniveau wie 2011. Im Jahr 2021 ist der Messwert aber, wie bei den anderen Messgebieten, tiefer. Damit ist der kurzfristige Trend nicht mehr signifikant zunehmend.

[42] Ein Vertrauensintervall gibt an, innerhalb welcher Grenzen sich die Parameter wahrscheinlich bewegen. Aus dem Vertrauensintervall lässt sich somit direkt die Signifikanz ablesen. Das Signifikanzniveau (α) in diesem Bericht ist 5 %. Weitere Erklärungen zur statistischen Auswertung sind im Anhang angefügt.

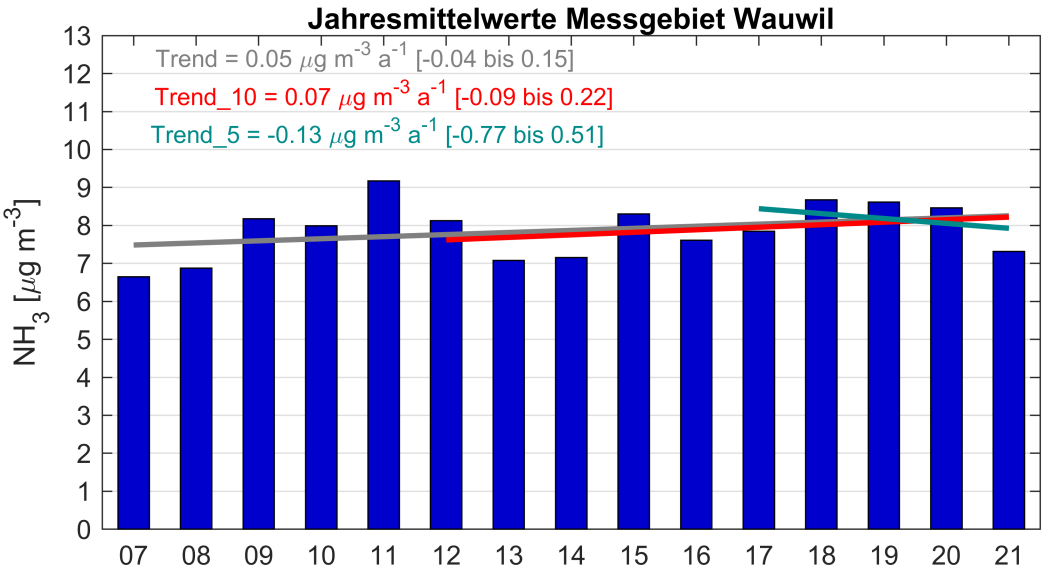


Abbildung 15: Trendberechnungen für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Wauwil seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17 und WAU19 (ohne WAU16.2). Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

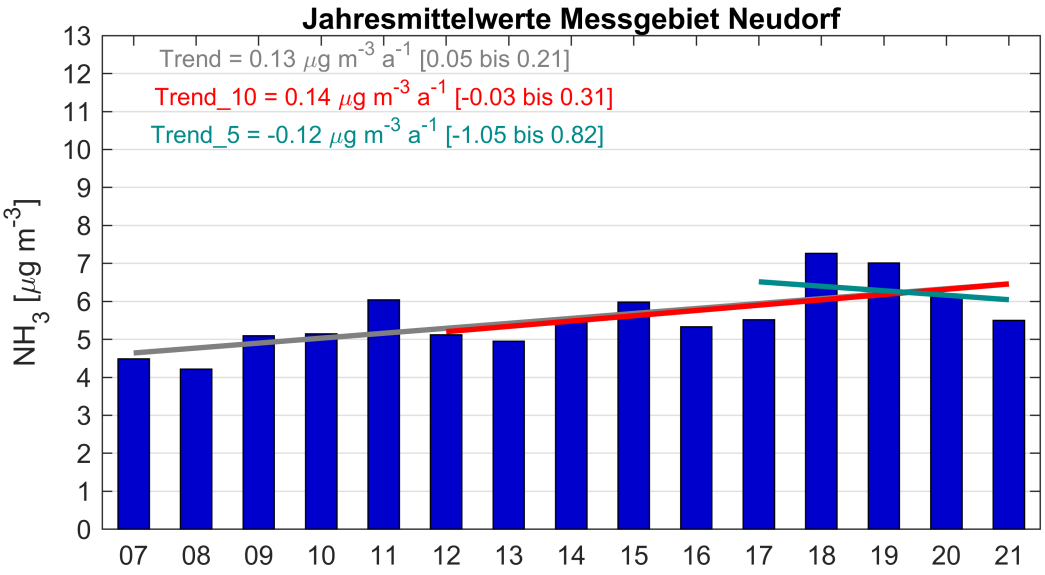


Abbildung 16: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Neudorf seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind NEU01, NEU02 und NEU03. Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

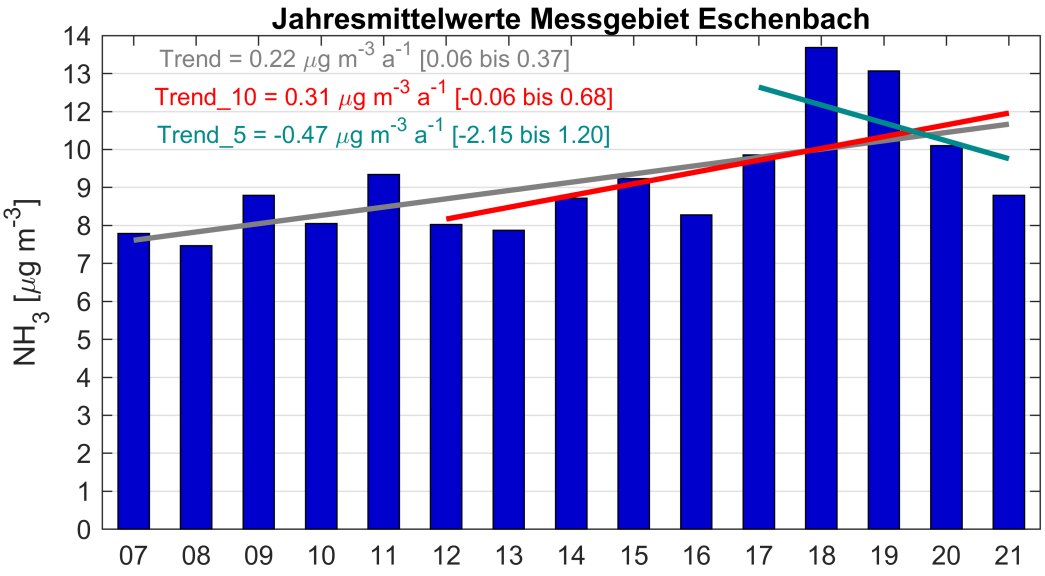


Abbildung 17: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Eschenbach seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind ESC07, ESC8, ESC14, ESC15 und ESC19. Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre. Zum besseren Verständnis wurde die y-Achsen-Skala in dieser Abbildung den Messwerten angepasst.

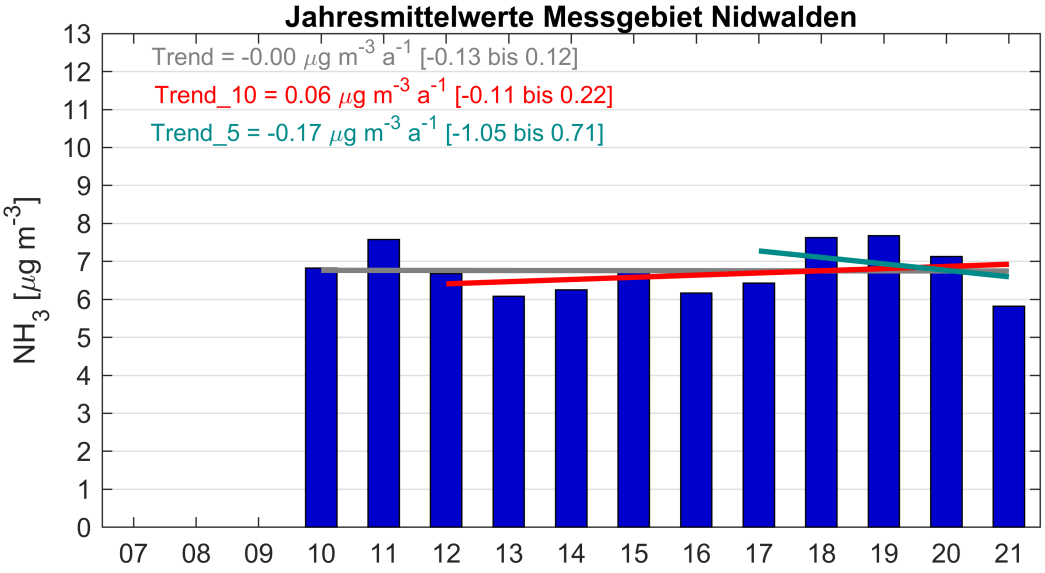


Abbildung 18: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Nidwalden seit Messbeginn 2010. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind NW01, NW02 und NW03. Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

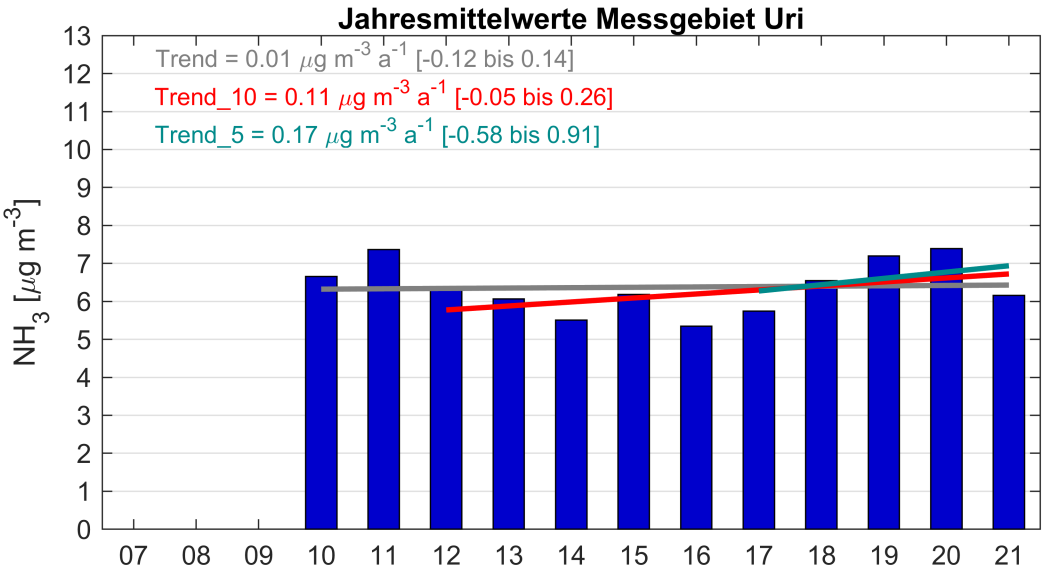


Abbildung 19: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Uri seit Messbeginn 2010. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind UR01, UR02 und UR03. Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

3.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkten

Die langfristige Trendberechnung umfasst die gesamte Messperiode berechnet («Trend», graue Linie). Zusätzlich ist ein zehnjähriger (”Trend_10”, rote Linie) und ein fünfjähriger Trend (”Trend_5”, türkise Linie) angegeben. Die Trendberechnung für alle Messpunkte ist im Anhang zu finden. In diesem Unterkapitel werden die Jahresmitteltrendberechnungen an vier ausgewählten Messpunkten aufgezeigt (Abbildungen 20 bis 23). Bei diesen vier ausgewählten Messpunkten handelt es sich um folgende landwirtschaftliche Nutzungen:

- SCHU00: Futterbau, Rinder werden z. T. gesömmert
- ESC14: mehrheitlich Futterbau, teilweise Ackerbau
- UR02: Futterbau
- ZB01: Futterbau; repräsentiert einen wenig belasteten Standort

Generell ist festzustellen, dass an vielen Messpunkten, wie teils schon im Vorjahr, eine tiefere Konzentration als in den Jahren 2018 und 2019 gemessen wurde. Damit erreichen die Messwerte wieder das Niveau von vor 2018, welches aber absolut gesehen immer noch hoch ist.

- SCHU00: Seit Messbeginn (2000) statistisch signifikante, zunehmende Ammoniakkonzentration (+0.09 µg m^{-3} pro Jahr). Nach einem leichten Rückgang zwischen 2015 und 2017 hat der Messwert in den Jahren 2018 und 2019 sprunghaft zugenommen. Die Messung liegt seit 2020 aber wieder im vorherigen Bereich.
- ESC14: Seit Messbeginn (2006) statistisch signifikante, zunehmende Ammoniakkonzentration (+0.35 µg m^{-3} pro Jahr). Der Wert aus 2021 ist, nach sehr hohen Messwerten in den Jahren 2018 und 2019, wieder auf ähnlichem Niveau wie vor 2017.
- UR02: Der langjährige Trend seit 2010 zeigt eine abnehmende Ammoniakkonzentration (-0.05 µg m^{-3} pro Jahr). Dieser ist aber nicht signifikant, da zwischen 2016 und 2020 stetig steigende Konzentrationen verzeichnet wurden. Im Jahre 2021 ist der Messwert zum ersten Mal seit 2016 wieder tiefer als im Vorjahr. Deshalb ist der fünfjährige Trend, im Gegensatz zum Vorjahr, nicht mehr signifikant zunehmend (+0.26 µg m^{-3} pro Jahr).
- ZB01: Der langfristige Trend ist gleichbleibend (+0.00 µg m^{-3} pro Jahr). Die Konzentrationen sind jedoch auf einem tieferen Niveau als bei den vorherig gezeigten Messpunkten.

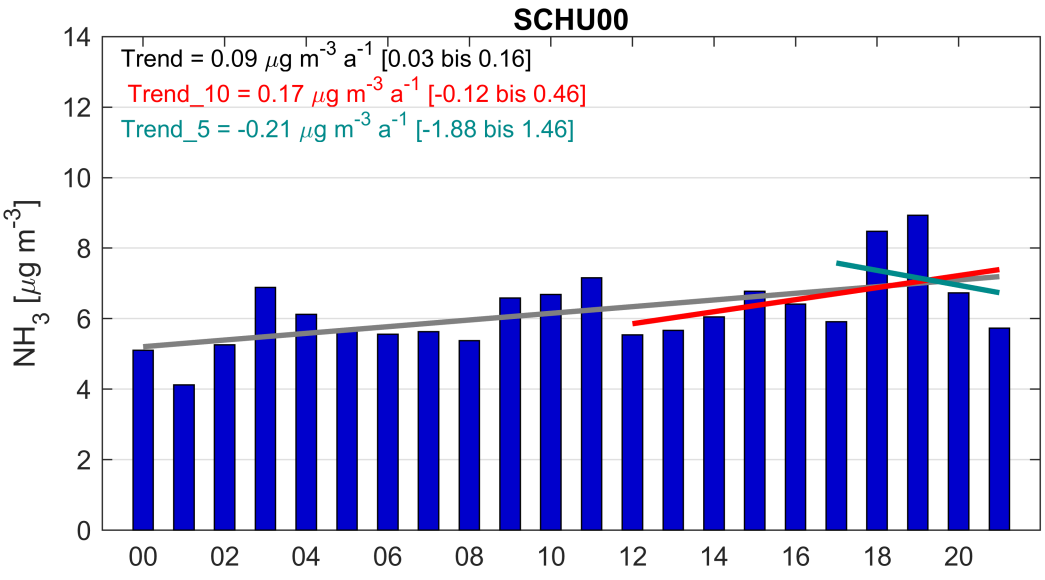


Abbildung 20: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt SCHU00. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre.

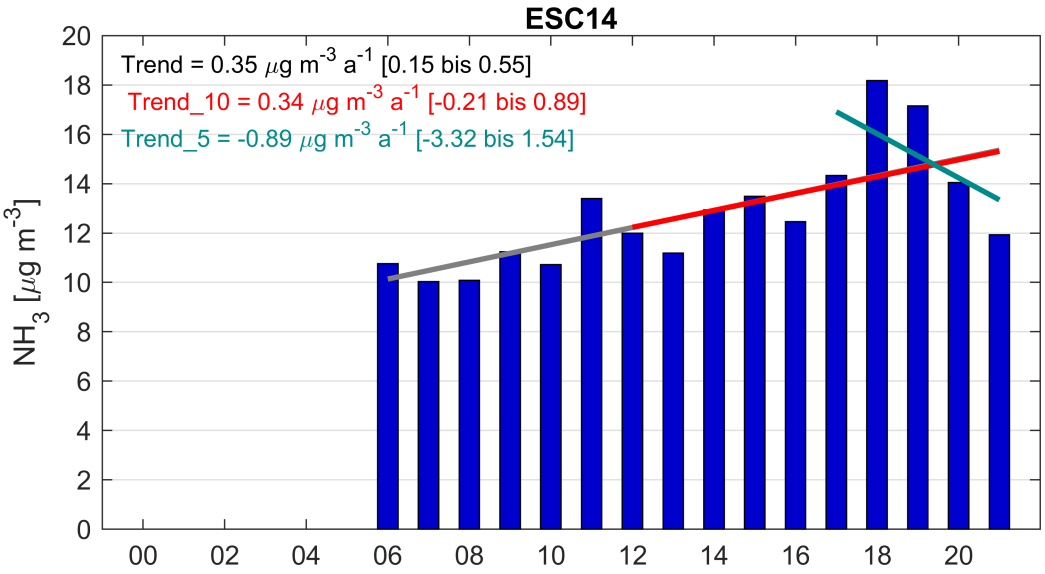


Abbildung 21: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ESC14. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre. Zum besseren Verständnis wurde die y-Achsen-Skala in dieser Abbildung den Messwerten angepasst.

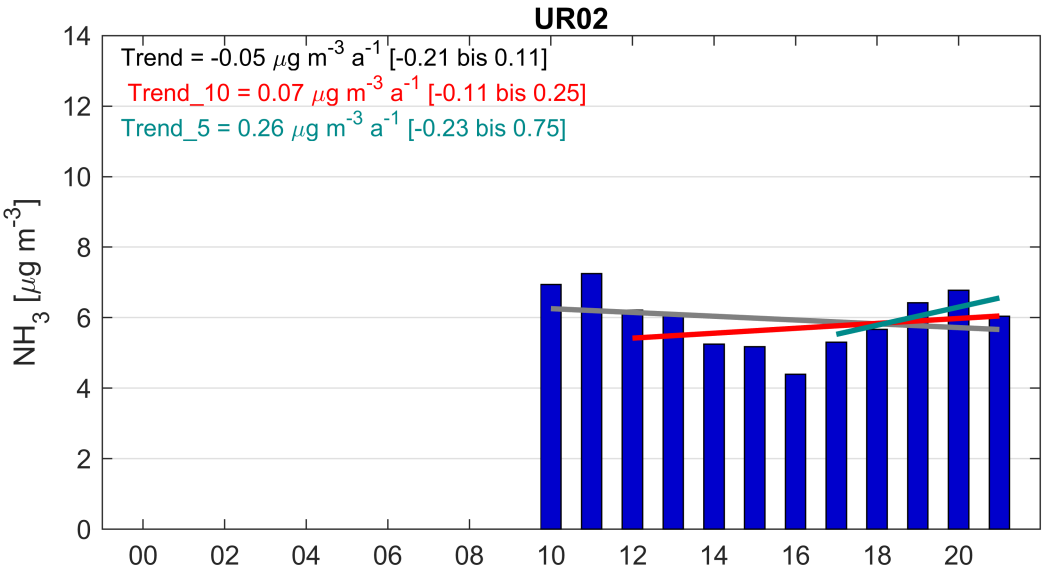


Abbildung 22: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt UR02. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre.

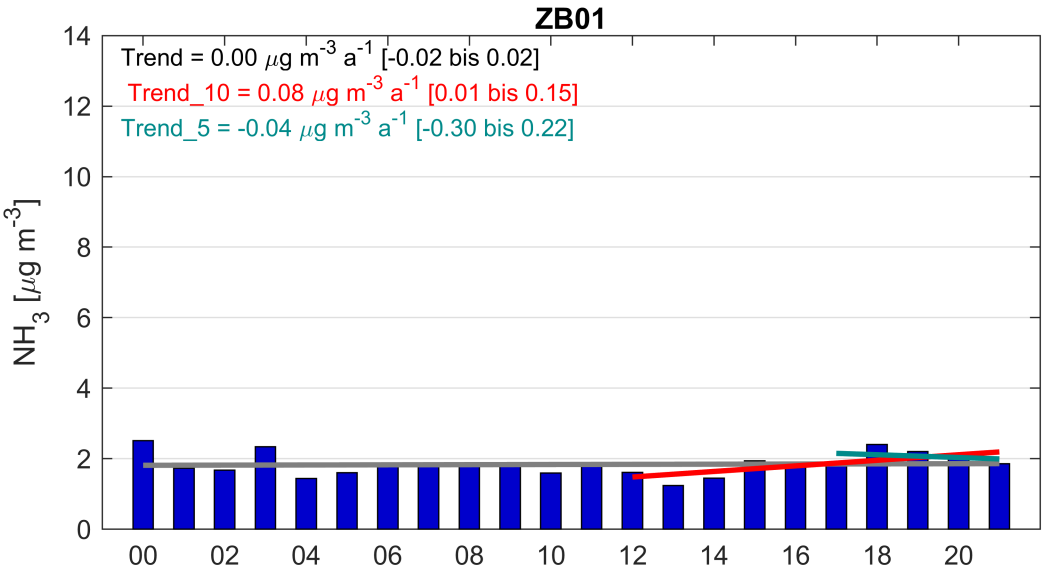


Abbildung 23: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ZB01. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre.

3.3 Stickstofffrachten durch Ammoniak

Zusätzlich zu den Critical Levels können zur Beurteilung von Stickstoffmengen, welche in ein Ökosystem eingetragen werden, auch Critical Loads betrachtet werden. Critical Loads beziehen sich auf Gesamtstickstofffrachten (Deposition). Sie bezeichnen die Grenze für den Eintrag von Stickstoff in empfindliche Ökosysteme, unterhalb welcher bei längerfristigem Eintrag nicht mit schädlichen Auswirkungen auf Struktur und Funktion des Ökosystems gerechnet wird. Die international festgelegten Critical Loads [43] aus allen Quellen liegen für Waldökosysteme bei 10 bis 20 kg N ha^{-1} a^{-1} und für Hochmoore bei 5 bis 10 kg N ha^{-1} a^{-1}. Die Stickstoff-Deposition F [kg N ha^{-1} a^{-1}] kann somit vereinfacht über die gemessene Ammoniakkonzentration C_{NH3}, die Expositionsdauer d_{exp} und die Depositionsgeschwindigkeit V_{dep} abgeschätzt werden:

$$F\ [\text{kg N ha}^{-1}\text{a}^{-1}] = V_{dep,i}\left[\frac{mm}{s}\right] * d_{exp}\left[\frac{s}{a}\right] * c_i\left[\frac{\mu g\ NH_3}{m^3}\right] * N_i\left[\frac{\{N\}}{\{NH_3\}}\right] * 10^4\left[\frac{m^2}{ha}\right] * 10^{-9}\left[\frac{kg}{\mu g}\right] * 10^{-3}\left[\frac{m}{mm}\right]$$

Die Depositionsgeschwindigkeit V_{dep} hängt von vielen Faktoren ab, z. B. Art der Vegetation, Feuchtigkeit der Erdoberfläche, Windgeschwindigkeiten etc. Hier wurde für die Depositionsgeschwindigkeit 30 mm s^{-1} verwendet, wie es für einen Waldstandort im Mittelland typisch ist. [44] Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde die Depositionsgeschwindigkeit bei dieser Berechnung für alle Standorte einheitlich gewählt, ungeachtet der Standortcharakteristiken und obwohl die berechnete Fracht natürlich von der gewählten Depositionsgeschwindigkeit abhängt. Zum Vergleich: Für eine flache Vegetation (Moor) wird von einer tieferen Depositionsgeschwindigkeit von 10 bis 20 mm s^{-1} ausgegangen.

Im vorliegenden Bericht wurde gemäss oben erklärter Formel die N-Deposition pro Jahr an ausgewählten Messpunkten berechnet (Tabelle 2). Dabei wurden alle Standorte des Ressourcenprogramms und von jedem Messgebiet des Kantons Luzern ein repräsentativer Standort betrachtet. Die berechneten N-Depositionen, die von Ammoniak verursacht werden, liegen je nach Standorteigenschaften zwischen 10 kg N a^{-1} (ZB01, 2013) und 90 kg N a^{-1} (ESC08, 2018). Über alle Jahre ist die N-Deposition an allen Messpunkten hoch geblieben.

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

[44] EKL (2005). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Statusbericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 384, Bern.

Werden die Stickstoffdepositionen der Tabelle 2 mit den maximalen Critical Loads verglichen (bis zu 10/15/20 N ha^{-1} a^{-1} für Hochmoore beziehungsweise Naturwiesen und Waldökosysteme, siehe Kapitel 1.2) wird ersichtlich, dass diese mehrfach überschritten werden. Die Frachten stellen letztendlich das ausschlaggebende Mass dar, wobei der Vergleich der Stickstoffdepositionen mit den Critical Loads bekanntermassen ein strengeres Kriterium darstellt, als dasjenige des Critical Level (siehe auch Kapitel 1.2). Die maximal zulässige Konzentration (Critical Level) wird nur verwendet, weil diese in erster Näherung einfacher mit den Messungen zu vergleichen ist. In den in Tabelle 2 abgeschätzten Frachten für Wald beinhalten ausschliesslich den Stickstoffeintrag durch Ammoniak. Die Anteile der Stickstoffdeposition, welche durch im Niederschlag gelöstes Ammonium und Nitrat sowie durch das Auskämmen von Ammoniumnitrat- und Ammoniumsulfat-haltigem Feinstaub verursacht werden, sind nicht berücksichtigt. Diese tragen etwa einen Viertel zur Gesamtfracht von Stickstoff bei. Das dort enthaltene Ammonium stammt ursächlich auch von Ammoniak, wird aber deutlich weiträumiger verfrachtet.

Die hier berechneten N-Depositionen durch Ammoniak sind vergleichbar mit jenen, welche mit einfachen, passiven Methoden im BAFU-Projekt bestimmt wurden. Letzteres zeigt auch, dass schon allein durch den Ammonium-Stickstoff im Niederschlag, d.h. ohne Nitrat, Gase und Aerosole, an einigen Standorten die Critical Loads überschritten werden.[45]

Abbildung 24 zeigt die Werte von Tabelle 2 in Bezug auf das Jahr 2010. Dieses Referenzjahr entspricht 100 %. Schwarz eingezeichnet ist ein berechneter Jahresmittelwert über alle ausgewählten Stationen seit 2010. Mit dieser Darstellung wird ersichtlich, dass die Ammoniak-Belastung im Jahr 2011 im Vergleich eher hoch war. Die sehr hoch berechnete N-Deposition in Schwyz 2011 wird von einem einzelnen Messpunkt beeinflusst. Die Jahre 2012 bis 2014 weisen relativ gesehen eine eher geringere Ammoniakbelastung auf. Ab 2016 steigen die Ammoniakdepositionen wieder. «ESC08» und «ZB01» erreichen 2018 Rekordwerte von über 150 %, welche diesmal nicht als Ausreisser von einzelnen Messpunkten betrachtet werden können. Im Jahr 2019 liegen ohne Ausnahme alle Depositionen über dem Referenzjahr. Auffällig ist HOL01, wo die Deposition 175 % des Referenzwerts beträgt. Diese Beobachtung wiederholt sich 2020. Ansonsten liegen in diesem Jahr alle berechneten Depositionen ausser diejenigen zweier Messpunkte (WAU16.4 und OW) über derjenigen des Referenzjahres 2010. Im Jahr 2021 sinken die Werte alle auf ein Niveau von vor 2018.

Tabelle 2: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak in kg N ha^{-1} a^{-1} an fünf verschiedenen Messpunkten sowie den ZUDK-Messgebieten des Ressourcenprogramms.[46]

	WAU16.4	ESC08	SCHÜ00	HOL01	ZB01	NW	OW	SZ	UR	ZG
2006	43.1	67.9	43.2	44.0	14.0	-	-	-	-	-
2007	38.6	59.6	43.8	44.0	14.6	-	-	-	-	-
2008	36.3	56.6	41.8	45.0	14.4	-	-	-	-	-
2009	49.8	58.5	51.2	50.6	14.3	-	-	-	-	-
2010	51.2	59.1	52.0	45.1	12.4	53.1	56.7	37.3	51.8	63.0
2011	57.2	69.3	55.7	51.1	13.9	58.9	65.7	54.7	57.3	70.5
2012	48.3	55.7	43.1	44.8	12.5	51.9	52.1	41.3	49.4	60.9
2013	40.0	51.2	44.1	45.3	9.6	47.3	51.0	28.5	47.1	49.5
2014	42.4	69.1	47.1	48.5	11.3	48.6	47.2	30.1	42.8	60.9
2015	46.9	67.9	52.7	48.5	15.1	52.9	55.8	41.7	48.1	59.2
2016	42.4	63.4	49.8	42.4	13.6	48.0	52.5	40.7	41.5	51.0
2017	43.8	77.0	46.0	57.7	14.5	50.0	51.5	32.6	44.7	59.9
2018	54.0	90.1	65.9	65.1	18.7	59.3	62.1	42.5	50.9	68.0
2019	53.3	80.2	69.5	78.8	17.1	59.7	63.5	41.6	55.9	66.3
2020	46.5	76.2	52.3	78.6	15.8	55.4	54.6	37.5	57.4	66.1
2021	40.7	65.6	44.6	58.7	14.4	45.3	48.4	33.4	47.9	60.9

[45] Seitler, E., Thöni, L., Meier, M. (2016). Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB.

[46] Die hier gezeigten Werte können durch ein neues Exportverfahren (Mittelwertberechnung) im Datenmanagement leicht von früheren Werten abweichen. In die Berechnung für OW fliessen hier nur OW-01 und OW-02 ein. Der Standort OW-03 wurde aufgehoben und stattdessen OW-04 in Betrieb genommen. Die Berechnung wurde auch auf die vorherigen Jahre angepasst. In die Berechnug für ZG fliessen aufgrund von Vandalismus ab Ende 2013 am Standort ZG-01 nur die Daten von ZG-02 und ZG-03 in die Berechnung ein. Die Berechnung wurde auch auf die vorherigen Jahre angepasst.

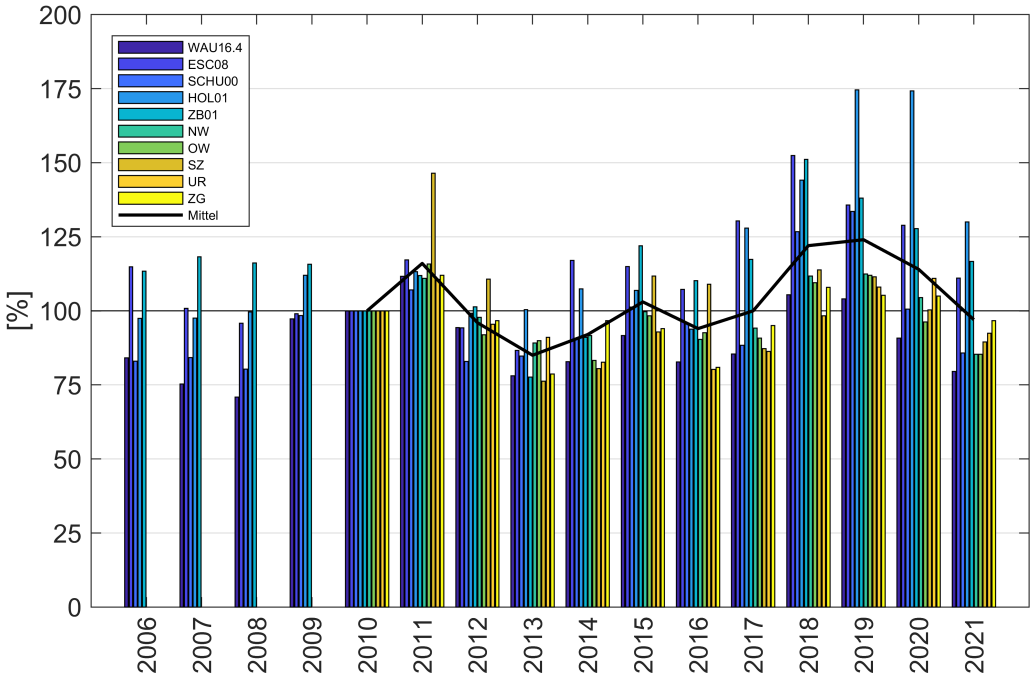


Abbildung 24: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak an fünf Messpunkten und in den fünf Ressourcenprojekt-Messgebieten Zentralschweiz in Bezug auf das Jahr 2010 (2010 = 100 %) sowie das Mittel der ausgewählten Messpunkte und -gebiete seit 2010 (schwarze Linie).

Es ist möglich, die zeitliche Entwicklung der Stickstofffrachten an einem Standort mit Hilfe von Frachtdiagrammen darzustellen. Dabei wird der Beitrag zum Stickstoffeintrag jeder einzelnen Messperiode berechnet (Konzentration x Depositionsgeschwindigkeit) und laufend aufsummiert. Die Fracht steigt rechnerisch integral mit der Zeit an. In Wirklichkeit ist es natürlich nicht so, dass sich Stickstoff mit der Zeit vollständig akkumulieren würde, da verschiedene Stickstoffsenken existieren: Stickstoff wird in die Pflanzenmasse eingebaut und Nitrat wird ins Grundwasser ausgewaschen. Bei vernässten Böden findet eine Denitrifikation, also eine Umwandlung von Stickstoffverbindungen in unter anderem Lachgas, statt. Grob kann aber gesagt werden, dass die unerwünschten Wirkungen des Stickstoffeintrages sehr wohl aufsummiert werden können. Die Wirkung an den Ökosystemen lässt sich als Integral der Fracht und Zeit erklären: Je höher der Stickstoffeintrag und je länger dieser dauert, desto stärker sind die unerwünschten Wirkungen. Die Darstellung der Frachtdiagramme dient dazu, einen Trend besser erkennen zu können. Die fortlaufende Aufsummierung hat zur Folge, dass kurzzeitige Schwankungen geglättet werden. Bleibt an einem Standort die Konzentration konstant, resultiert eine linear ansteigende Gerade. Nimmt die Konzentration ab, ergibt sich eine nach unten gekrümmte Kurve, bei einem Anstieg der Belastung biegt sich die Kurve nach oben. Alle Frachtdiagramme der diversen Messpunkte sind im Anhang zu finden.

Abbildung 25 zeigt die Frachtdiagramme von fünf ausgewählten Messpunkten. Startpunkt ist das Jahr 2006. Je steiler die Gerade, umso höher die Belastung. Als Lesehilfe ist jeweils als gestrichelte Linie die lineare Regressionsfunktion dargestellt, sowie in Zahlen die mittlere N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr. Bei den fünf Messpunkten WAU16.4, SCHÜ00, RO und ZB01 (Abbildung 25) weichen die Frachtkurven bis 2017 kaum von einer Geraden ab, was als gleichbleibender Stickstoffeintrag zu interpretieren ist. Nur bei ESC08 ist eine leichte Abnahme, also eine nach unten gekrümmte Kurve zwischen 2013 und 2016, sichtbar. Ab 2018 ändert sich dieses Bild aber für alle gezeigten Messpunkte: Die Kurven weichen gegen oben von der Geraden ab. Dieser Knick ist, wenn auch nur leicht, bei allen gezeigten Stationen sichtbar. Die berechneten mittleren jährlichen Depositionen (Zahlen rechts der Abbildung 25) steigen im Vergleich zum Bericht von 2017. Dies zeigt nochmals, dass in den Jahren 2018 bis 2020 deutlich höhere Ammoniakkonzentrationen gemessen wurden als zuvor.

Abbildung 26 zeigt das Frachtdiagramm für die Ressourcenprojekt-Standorte Zentralschweiz mit Messbeginn im Jahr 2010. Als Lesehilfe ist wiederum die lineare Funktion als gestrichelte Linie dargestellt, sowie in Zahlen die mittlere N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr. Auch hier sind für 2018 bis 2020 die bereits in Abbildung 25 beobachteten nach oben gerichtete Knicke zu sehen. Daher steigen die mittleren Depositionszahlen teilweise zum wiederholten Mal.

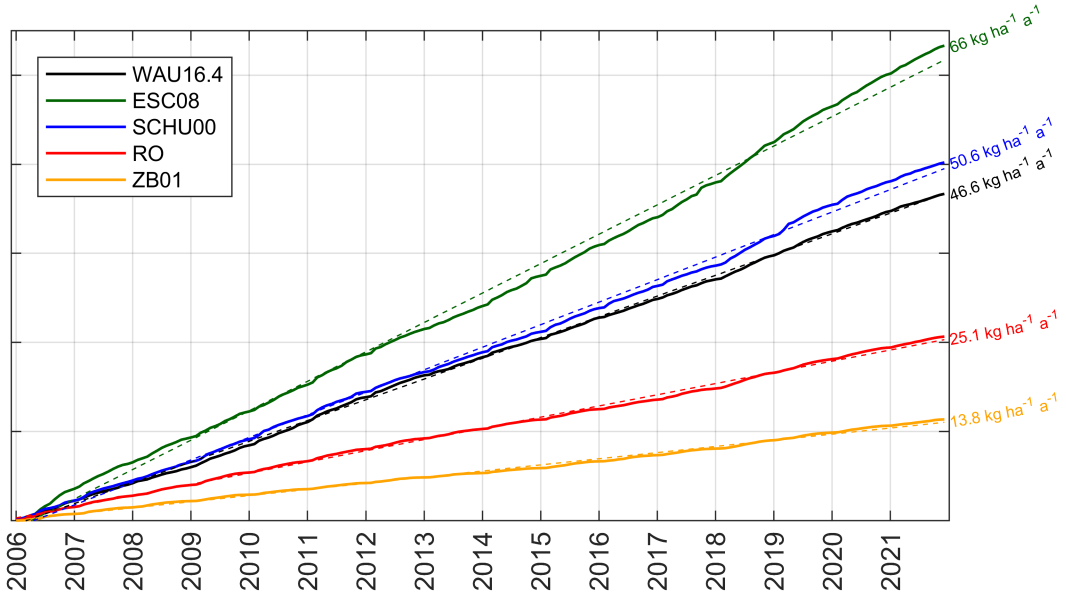


Abbildung 25: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Depositionen seit Januar 2006 bis Dezember 2018 an fünf verschiedenen Messpunkten in der Zentralschweiz. Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion, die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittlere N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr, berechnet aus der linearen Regressionsfunktion.

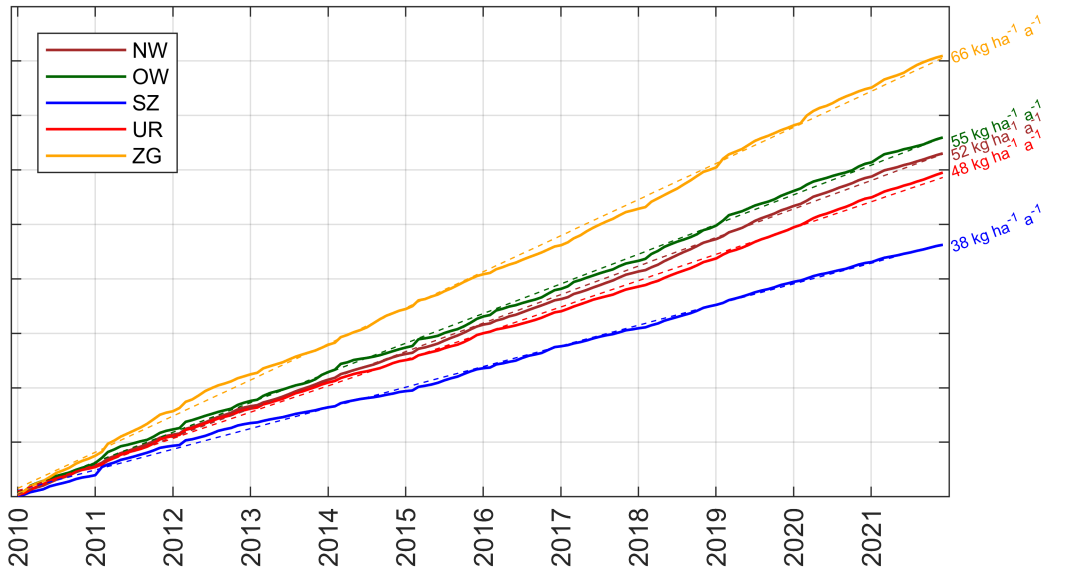


Abbildung 26: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Deposition aller Ressourcenprojekt-Standorte der ZUDK (Ressourcenprojekt-Messpunkte seit 2010). Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion. Die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittleren N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr, berechnet aus der linearen Regressionsfunktion. Im Gegensatz zu früheren Berichten wurde für das Messgebiet Zug neben ZG-02 und ZG-03 auch der Messpunkt ZG-01 miteinbezogen. Die Lücken im Jahr 2013/14 wurden durch den Mittelwert von monatlichen Messwerten anderer Jahre approximiert. Die berücksichtigten Messpunkte sind: UR-01, UR-02, UR-03 (UR); SZ-01, SZ-02, SZ-03 (SZ); OW-01, OW-02 (OW); NW-01, NW-02, NW-03 (NW); ZG-01, ZG-02, ZG-03 (ZG).

3.4 Einfluss der Meteorologie auf NH_3-Trends

Die jährliche Variabilität der gemessenen Ammoniakkonzentrationen ist unter anderem auf die Schwankungen der Witterung zurückzuführen. Philipp & Locher (2010)[47] haben in einer statistischen Trendanalyse und Modellierung gefunden, dass die monatliche Abweichung vom 10-jährigen Mittel der Temperatur, Anzahl Trockentage und der Windgeschwindigkeit entscheidend ist für die gemessene NH_3-Immission: "Die NH_3-Immissionen steigen […] mit steigender Lufttemperatur und Erhöhung der mittleren Anzahl Trockentage und sinken mit zunehmendem Wind".

So spielten die Witterungsverhältnisse 2018–2021 wohl eine wichtige Rolle für die Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen: Die drei Jahre 2018–2020 waren geprägt von hohen Temperaturen, andererseits aber teilweise auch von fehlenden Niederschlägen während der warmen Jahreszeit. Die mittlere Jahrestemperatur betrug landesweit 6.9 °C in den Jahren 2018 und 2020 und 6.5 °C im Jahre 2019. Dies sind Temperaturüberschüsse von +1.5 °C bzw. + 1.1 °C verglichen mit dem Normwert der Periode von 1981-2010. Betrachtet man nur das Sommerhalbjahr, betrug dieser Überschuss 2018 sogar +2.4 °C. Im Jahr 2019 gab es Ende Juni und Juli mehrtägigen Hitzewellen. Im Jahr 2020 geprägt vom drittwärmsten Frühling seit Messbeginn (+1.8 °C), welcher auch extrem sonnig und trocken war. Ende Juli und Anfang August gab es zwei moderate Hitzewellen. Der Herbst war gegensätzlich, wobei der Oktober kühl und niederschlagsreich war.[48] [49] [50]

Der Februar 2021 war unüblich warm (+4 °C über der Norm 1981–2010), die Monate April und Mai hingegen, wie schon 2013 und 2019, sehr kühl. Der Sommer 2021 war geprägt von starken Niederschlägen, welche an vielen Orten zu Überschwemmungen führten. Der Herbst war trocken und der erste Schnee fiel bereits Ende November. Die Jahresmitteltemperatur war +0.3 °C über der Norm 1981–2010.[51]

Diese meteorologischen Umstände machen sich in den Messungen der vier letzten Jahre bemerkbar. Die sommerliche Hitze zusammen mit trockenen Phasen in den Jahren 2018 bis 2020 hat dazu beigetragen, dass erstens mehr Ammoniak in die Luft entwich und zweitens dort verweilen konnte. Mit den aussergewöhnlichen kühlen und regnerischen Wetterlagen 2021 sank die Ammoniakkonzentration wieder. Allerdings ist unklar, wie viel Stickstoff dafür über Nitratauswaschung verloren ging.

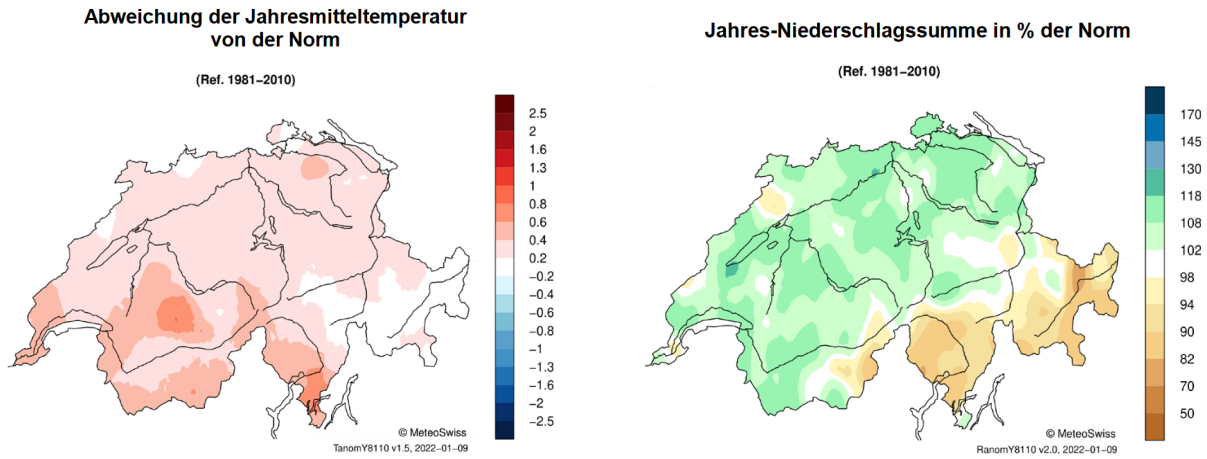


Abbildung 27: Links: Abweichung der Jahresmitteltemperatur 2021 von der Norm (1981-2010) in °C . Rechts: Jahres-Niederschlagssumme in Prozent der Norm (1981-2010). [52]

[47] Philipp, M., & Locher, R. (2010). Trendanalyse NH_3-Immissionsmessungen in der Schweiz (S. 38). Winterthur: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
[48] MeteoSchweiz (2019). Klimabulletin Jahr 2018.
[49] MeteoSchweiz (2020). Klimabulletin Jahr 2019.
[50] MeteoSchweiz (2021). Klimabulletin Jahr 2020.
[51] MeteoSchweiz (2022). Klimabulletin Jahr 2021.
[52] MeteoSchweiz (2022). Klimabulletin Jahr 2021.

4 Diskussion

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz 2021 bewegen sich auf dem Niveau der Werte von vor 2018 und sind damit tiefer als in den Hitzejahren 2018/19 sowie 2020. Ein erster hoher Peak ist an den meisten Messpunkten im März 2021 zu sehen, was mit dem synchronen Ausbringen von Gülle zusammenfällt. Im Gegensatz zu 2018/19 sinken die Konzentrationen im Frühsommer teilweise. An manchen Messpunkten ist ein Sommerpeak erkennbar. Die Herbstpeaks tauchen im November auf.

Durch die hohen Ammoniakwerte zwischen 2018 und 2020 und die nun tieferen Werte 2021 unterscheiden sich (positive) lang- und mittelfristige Trends von den (negativen) kurzfristigen. Die Werte bleiben aber trotz der Abnahme auf hohem Niveau. Die in den entsprechenden Gebieten getroffenen Massnahmen für eine verbesserte Luftreinhaltung zeigen somit zu wenig Wirkung, um die Ammoniakimmissionen ganzjährig und langfristig zu senken. Zu gleichen Ergebnissen kommt auch der schweizweite Bericht zu Ammoniak-Immissionsmessungen. [53] Ein Grund für diese Entwicklungen ist unter anderem die spezielle Witterung der letzten Jahre mit hohen Temperaturen und trockenen Perioden (2018–2020). Durch diese meteorologischen Verhältnisse entwich viel Stickstoff in Form von Ammoniak aus der Gülle und verweilte anschliessend in der Atmosphäre. Im Gegensatz dazu zeigte das Jahr 2021 einen kühlen Frühling mit verregnetem Sommer, wodurch die Ammoniakverluste durch die Luft zurückgingen. Dies heisst jedoch nicht, dass der Stickstoffverlust aus der Landwirtschaft insgesamt kleiner wurde. Für eine ganzheitliche Analyse diesbezüglich müsste die Nitratauswaschung aus dem Boden in tiefere Bodenschichten und das Grundwasser quantifiziert werden.

Generell wird empfohlen, Gülle bei kühlen und feuchten Bedingungen auszutragen.[54] [55] [56] Diese Massnahme wird aber zum Beispiel im «Massnahmenplan Ammoniak» vom Kanton Zug nicht gesondert aufgeführt, weil sie nicht geprüft werden kann.[57] Gemäss der Datenlage muss davon ausgegangen werden, dass Landwirte zwischen 2018 und 2020 aus betrieblichen Gründen die Gülle trotz der anhaltenden heissen Trockenheit ausgebracht haben. Es ist jedoch fraglich, wie gross der Nettonutzen einer Güllegabe bei derartigen meteorologischen Bedingungen ist. Allerdings gibt es bisher nur spärliche Literaturangaben zur Effizienz von Güllegaben in Abhängigkeit der Lufttemperatur.[58] [59] [60] Dieser Zusammenhang sollte besser untersucht werden, um den Landwirten faktenbasierte Empfehlungen geben zu können.

Bezüglich der Messungen ist es dringend notwendig, diese an möglichst vielen Standorten über mehrere Jahre weiterzuführen. Viele Messungen zeigen gleichbleibende oder positive Trends auf. Das Ziel 2017 (Abbildung 1), die Ammoniakemissionen auf nationalem Level im Vergleich zu 2010 um etwa 25 % zu senken, wurde nicht erreicht. Die von der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL) als Zielgrössen empfohlenen Critical Loads und Critical Level in den vorliegenden Messungen regelmässig und teilweise stark überschritten. Wichtig ist, dass das Monitoring nicht nur an exponierten landwirtschaftlichen Standorten erfolgt, sondern auch ökologisch sensitive Standorte untersucht werden. Um eine wirkliche Abnahme in den Ammoniakimmissionen statistisch signifikant belegen zu können, müsste gemäss Philipp & Locher (2010) eine 10-jährige Messreihe mit einer Abnahme von 1 % pro Jahr an 17 nicht-korrelierten Standorten in der zu untersuchenden Region vorhanden sein. Bei einer 5-jährigen Analyse müsste die jährliche Reduktion 2 % betragen.

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

[54] Agridea (2011). Ammoniakverluste aus der Landwirtschaft. Merkblatt.

[55] Richner W. & Sinaj S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.

[56] Wey, H., Ruckstuhl, Ch. (2019): Übersicht über die Immissionsmessungen im Kanton Uri mit Fokus auf das Jahr 2018. Zusatzkapitel 9: Das meteorologische Extremjahr 2018 im Kanton Uri. inNET AG.

[57] Amt für Umwelt Kanton Zug (2016). Massnahmenplan Ammoniak 2016 - 2030 Kanton Zug. https://www.zg.ch/behoerden/baudirektion/amt-fuer-umwelt/landwirtschaft/luftreinhaltung-in-der-landwirtschaft/massnahmenplan-ammoniak

[58] Hersener, J.-L., Meier, U., & Dinkel, F. (2002). Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmass-nahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung. Amt für Umweltschutz Kanton Luzern. Tabelle 19, S.22 nach Döhler 2001.

[59] Cormann, M. (unpublished, 2019). Application of 15N labelled slurry in a microplot field study: Ammonia volatilization and N dynamics in plant and soil N pools (S. 65).

[60] Häni, Ch., Sintermann, J., Kupper, Th., Jocher, M., & Neftel, A. (2016). Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. Atmospheric Environment, 125, 92–99. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.069

5 Anhang

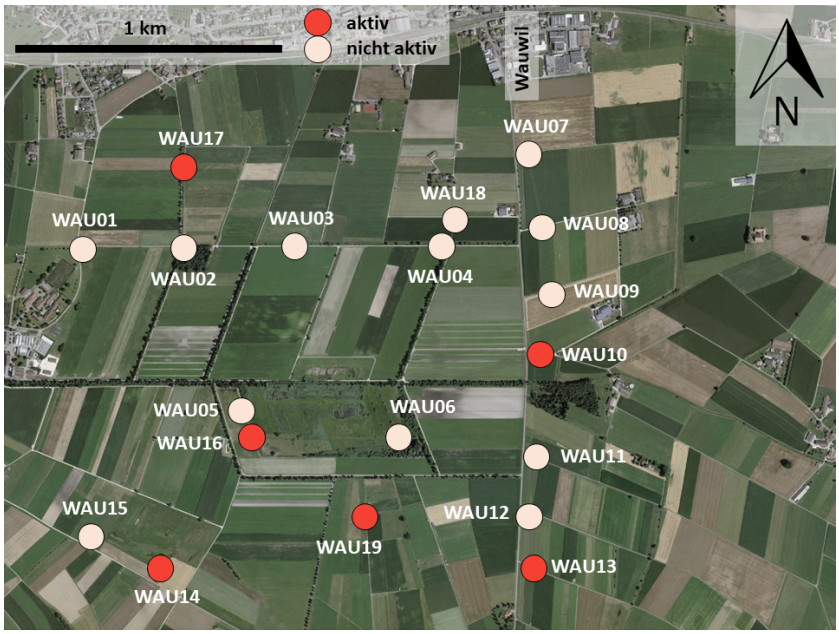
5.1 Detaillierte Standortbeschreibungen

In der Folge sind die Standorte der Messpunkte einzeln aufgezeigt. Dabei stehen rote Punkte für momentan aktive und rosa Punkte für inaktive Messungen. 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 eine Nord-Süd- und eine Ost-West-Transekte hinzu, um die lokal-räumliche Verteilung der Ammoniakkonzentration zu durchleuchten. Zusätzlich wurden rund um das Naturschutzgebiet Wauwiler Moos Ammoniakmessungen durchgeführt. In der Karte sind die momentan aktiven Messpunkte dunkelrot eingezeichnet.

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



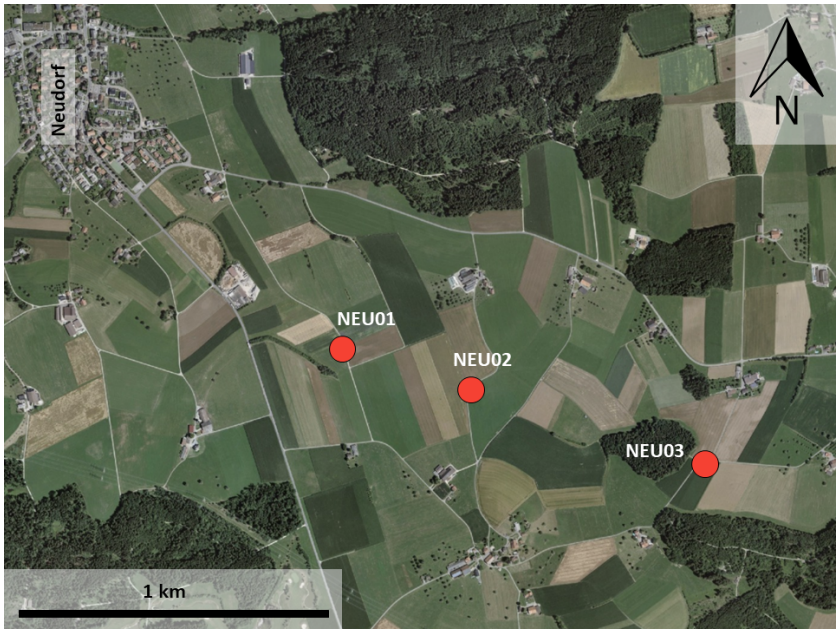
5.1.2 Eschenbach, Luzern

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



5.1.3 Neudorf, Luzern

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



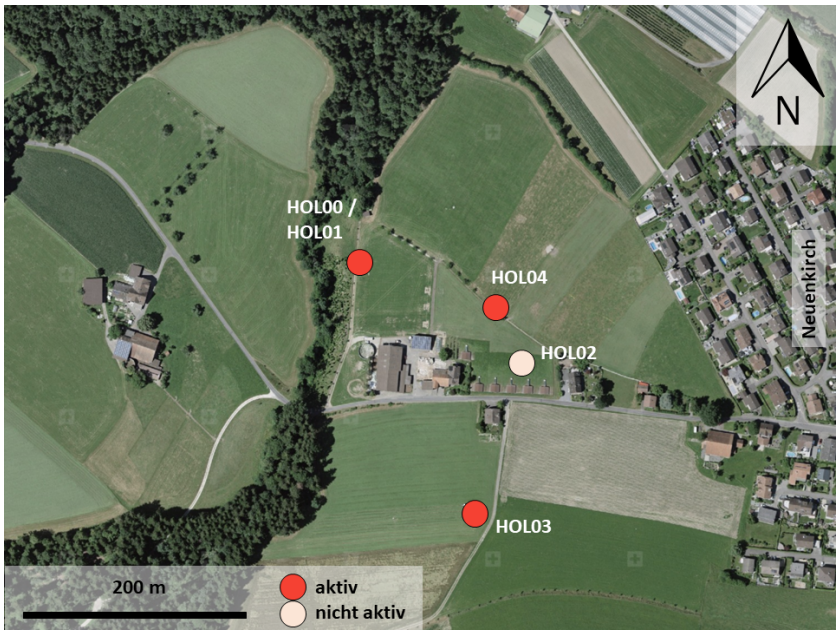
5.1.4 Schüpfheim, Luzern

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



5.1.5 Holderhus, Luzern

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



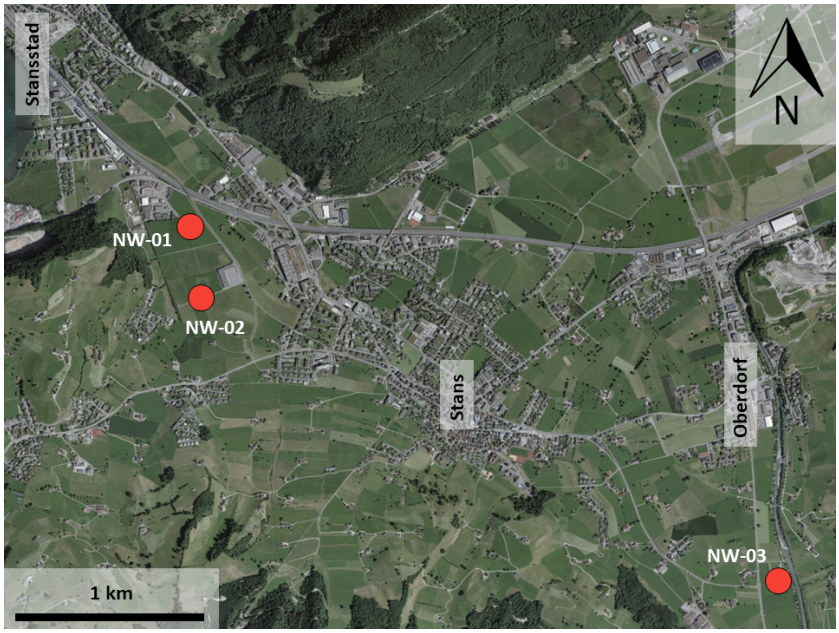
5.1.6 Root Michaelskreuz, Luzern

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



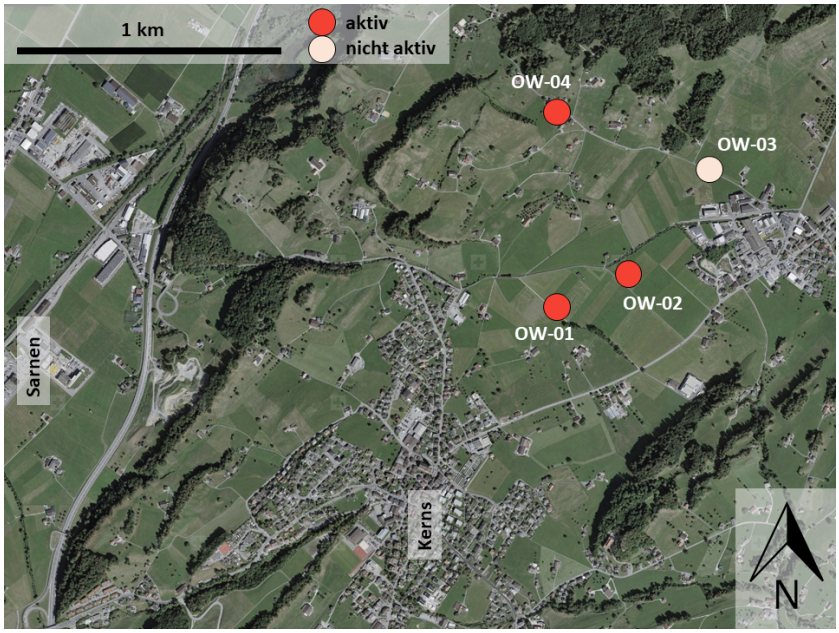
5.1.7 Nidwalden

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



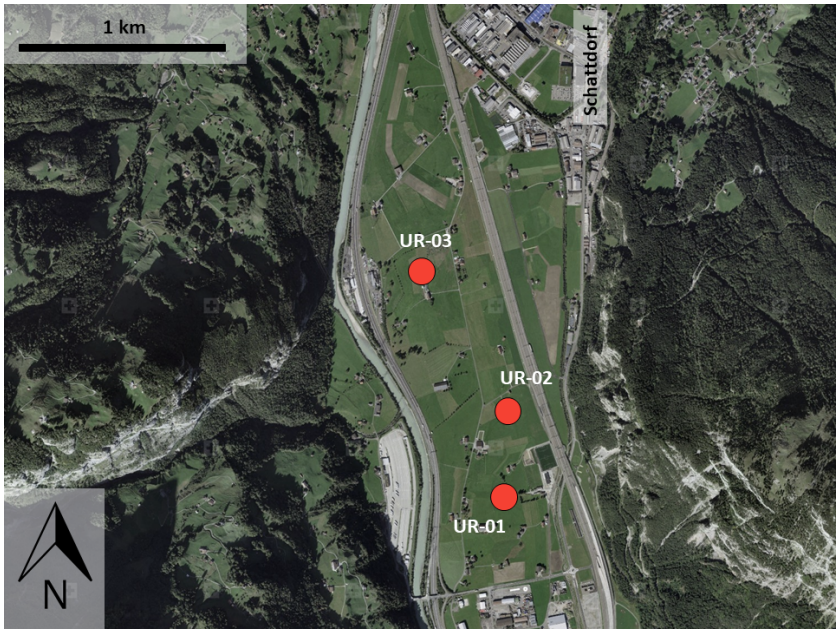
5.1.8 Obwalden

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.



5.1.9 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.



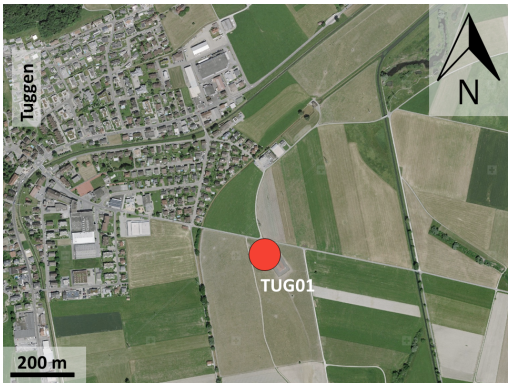
5.1.10 Schwyz

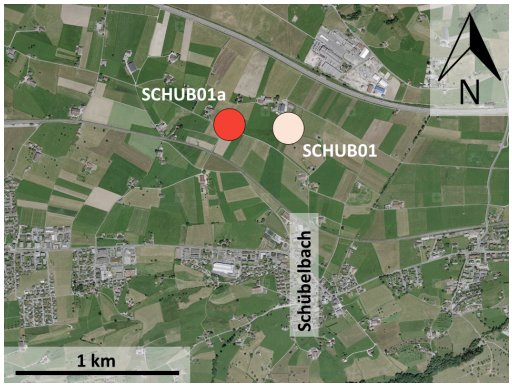
Im Talkessel von Schwyz in der Nähe von Ibach liegen die Ammoniak-Messpunkte des Kantons Schwyz, von welchen momentan zwei aktiv sind. Diese drei Messpunkte SZ-01, SZ-02 und SZ-03 wurden ebenfalls im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz installiert. Im Februar 2020 wurden die Messpunkte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



Zusätzlich wurde im Kanton Schwyz von 2014–2017 und wiederum ab Frühjahr 2019 in Wangen die Ammoniakkonzentration gemessen. Der Messpunkt (WAN01) liegt in der Linthebene zwischen Wangen und Lachen und wurde aufgrund der Flechtenkartierung 2013 bzw. aufgrund der Messperiode 2014–2017 so gewählt.
Ebenfalls seit Frühjahr 2019 werden Messungen in Schübelbach (SCHUB01) und Tuggen (TUG01) durchgeführt.







5.1.11 Zug

Die fünf kantonalen Messgebiete mit je einem Messpunkt verteilen sich über das gesamte Kantonsgebiet, wobei die Station Zugerberg (ZB) durch das Institut für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) betrieben wird. Bei der Auswahl der Messgebiete interessierte vor allem, wie die Ammoniakbelastung in sensiblen Ökosystemen, für die sowohl Critical Loads als auch Critical Levels definiert sind, aussieht (Messgebiete Zigerhüttli, Früebüel 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.
- Früebüel (FRÜE): Das Messgebiet steht im landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb der ETH Zürich, nahe von Moorgebieten. 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.

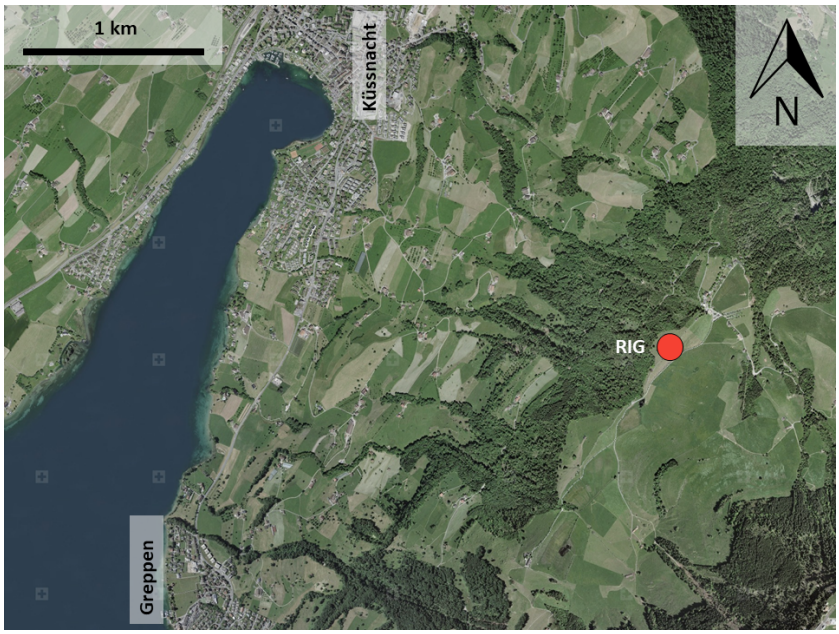


Neben fünf kantonalen Messstationen hat der Kanton Zug im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz zusätzlich drei Messpunkte installiert. Diese liegen im Gebiet nördlich von Hagendorn (Gemeinde Cham). Die Flächen um die Messpunkte werden acker- wie auch futterbaulich genutzt. Die Topographie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



5.2 Charakterisierung der Messpunkte

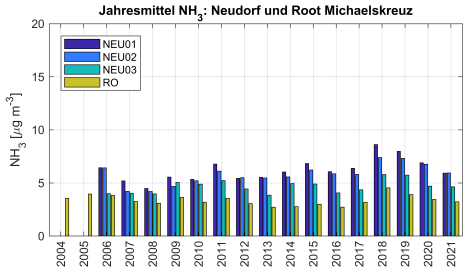
Tabelle 3: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte, Teil 1. Die angegebenen Jahreswerte sind Jahresmittel in µg m^{-3}.

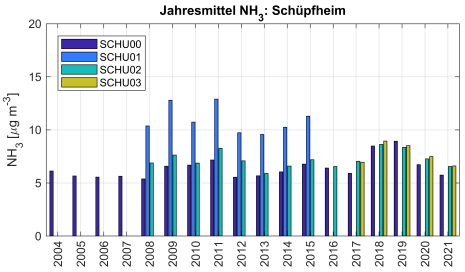
Standort		Messnetz	E-Koord.	N-Koord.											
					2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
WAU10	Wauwil 10	Luzern	2 644 735	1 224 950	9.2	8.3	7.4	7.3	8.9	7.5	8.4	9.4	9.0	8.7	8.1
WAU13	Wauwil 13	Luzern	2 644 694	1224173	10.9	10.3	9.2	9.0	10.0	9.5	9.8	10.9	11.1	12.3	10.0
WAU14	Wauwil 14	Luzern	2 643 364	1 224 124	10.0	9.0	7.5	7.6	9.5	8.4	8.8	8.1	8.9	8.9	7.5
WAU16.2	Wauwil 16.2	Luzern	2 643 707	1 224 651	6.7	5.7	4.6	4.8	5.3	4.8	5.1	6.2	6.3	5.4	4.6
WAU16.4	Wauwil 16.4	Luzern	2 643 707	1 224 651	7.3	6.2	5.1	5.5	6.0	5.5	5.6	6.9	6.9	6.0	5.2
WAU17	Wauwil 17	Luzern	2 643 451	1 225 590	9.0	7.8	7.1	6.5	7.3	6.7	7.3	8.5	8.3	7.9	6.6
WAU19	Wauwil 19	Luzern	2 644 113	1 224 324	8.6	7.2	6.2	7.1	8.0	8.0	7.1	8.2	7.6	7.1	6.4
NEU01	Neudorf 1	Luzern	2 659 290	1 224 550	6.8	5.4	5.5	6.0	6.8	6.1	6.4	8.6	8.0	6.9	5.9
NEU02	Neudorf 2	Luzern	2 659 706	1 224 499	6.1	5.5	5.5	5.6	6.2	5.9	5.8	7.4	7.3	6.8	5.9
NEU03	Neudorf 3	Luzern	2 660 470	1 224 246	5.2	4.4	3.9	5.0	4.9	4.1	4.4	5.8	5.7	4.7	4.6
SCHÜ00	Schüpfheim 0	Luzern	2 644 727	1 201 091	7.1	5.5	5.7	6.1	6.8	6.4	5.9	8.5	8.9	6.7	5.7
SCHÜ01	Schüpfheim 1	Luzern	2 645 021	1 201 587	12.9	9.7	9.6	10.2	11.3	-	-	-	-	-	-
SCHÜ02	Schüpfheim 2	Luzern	2 644 537	1 201 575	8.3	7.1	5.9	6.6	7.2	6.6	7.0	8.6	8.4	7.3	6.6
SCHÜ03	Schüpfheim 3	Luzern	2 644 883	1 201 384	-	-	-	-	-	-	7.0	8.9	8.5	7.5	6.6
HOL01	Holderhus 1	Luzern	2 657 129	1 216 962	6.6	5.8	5.8	6.2	6.2	5.5	7.4	8.3	10.1	10.1	7.5
HOL03	Holderhus 3	Luzern	2 657 229	1 216 724	6.8	5.4	5.1	6.1	5.8	5.6	5.1	7.2	6.3	5.6	4.8
HOL04	Holderhus 4	Luzern	2 657 256	1 216 902	12.6	10.0	9.4	9.9	9.2	8.9	9.9	11.5	10.2	9.8	10.0
RO	Root Michaelskreuz	Luzern	2 673 847	1 218 489	3.6	3.0	2.7	2.8	3.0	2.7	3.2	4.5	3.9	3.4	3.2
ESC07	Eschenbach 7	Luzern	2 665 253	1 221 074	8.7	7.9	8.2	8.5	8.7	7.5	9.5	12.8	12.0	10.2	8.8
ESC08	Eschenbach 8	Luzern	2 665 208	1 221 946	8.9	7.2	6.6	8.9	8.7	8.2	9.9	11.6	10.3	9.8	8.4
ESC14	Eschenbach 14	Luzern	2 663 387	1 220 976	13.4	12.0	11.2	12.9	13.5	12.5	14.3	18.2	17.2	14.0	11.9
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
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
NW-01	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
NW-02	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
NW-03	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
OW-01	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
OW-02	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
OW-03	Obwalden 3	RP A-ZS	2 664 798	1 195 978	5.5	4.2	5.0	4.0	4.7	-	-	-	-	-	-
OW-04	Obwalden 4	RP A-ZS	2 664 301	1 196 174	-	-	-	-	-	-	6.9	7.8	10.0	9.7	8.4

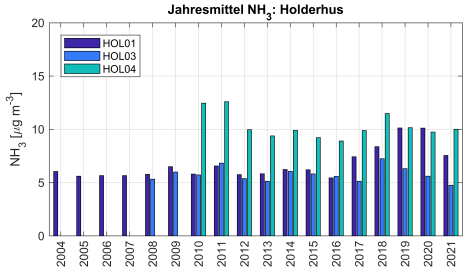
Tabelle 4: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte, Teil 2. Die angegebenen Jahreswerte sind Jahresmittel in µg m^{-3}.

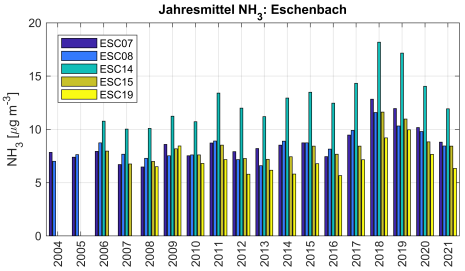
Standort		Messnetz	E-Koord.	N-Koord.											
					2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
SZ-01	Bauschli	RP A-ZS	2 692 420	1 207 555	6.0	4.9	3.7	3.6	5.1	4.2	4.0	5.1	4.9	4.8	4.3
SZ-02	Tändlen	RP A-ZS	2 692 890	1 207 272	9.0	5.6	3.2	4.2	5.8	6.8	4.6	5.6	5.7	-	-
SZ-03	Rossmattli	RP A-ZS	2 692 550	1 207 040	6.4	5.4	4.1	3.8	5.1	4.7	3.9	5.6	5.5	-	-
SZ-03a		RP A-ZS	2 692 452	1 207 210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.1	5.0
UR-01	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
UR-02	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
UR-03	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
UR-APRO	Schloss A Pro	-	2 689 265	1 193 430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UR-GRT	Gartenmatt	-	2 690 175	1 193 550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UR-SCB	Schattdorf-Bürglen	-	2 693 000	1 191 608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZG-01	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
ZG-02	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
ZG-03	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
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
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
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
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
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
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
WAN01	Wangen 01	Kt. Schwyz	2 709 749	1 227 700	-	-	-	7.7	9.2	8.2	7.6	-	9.3	9.2	-
WAN01a	Wangen 01a	Kt. Schwyz	2 709 332	1 227 470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SCHUB01	Schübelbach	Kt. Schwyz	2 712 631	1 226 837	-	-	-	-	-	-	-	-	14.1	14.3	-
SCHUB01a	Schübelbach	Kt. Schwyz	2 712 488	1 226 762	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TUG01	Tuggen	Kt. Schwyz	2 714 630	1 228 761	-	-	-	-	-	-	-	-	7.8	7.6	6.4

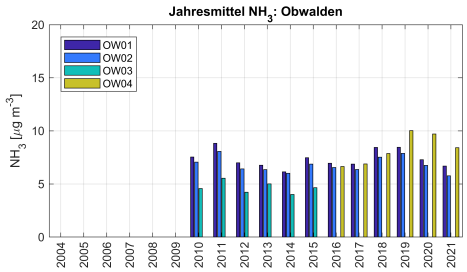
5.3 Mittlerer Jahresgang der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten

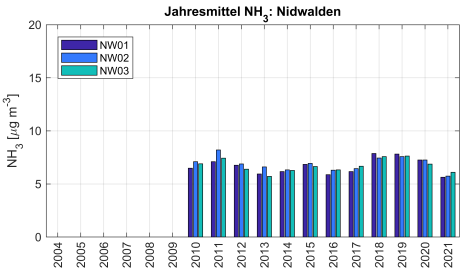


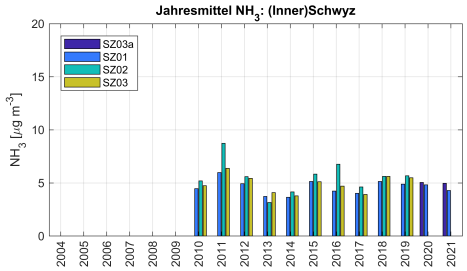


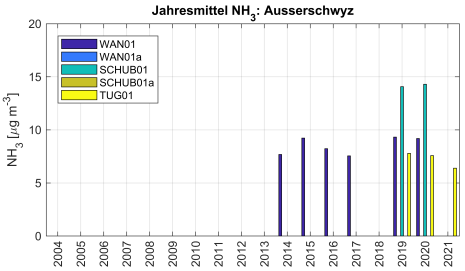


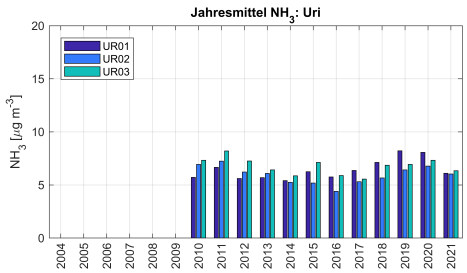


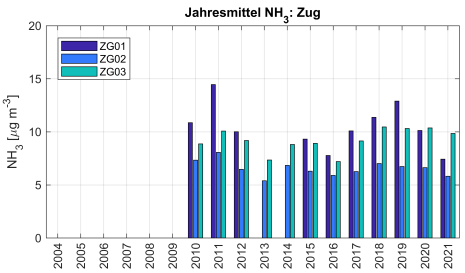


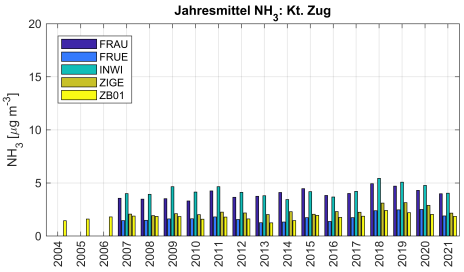




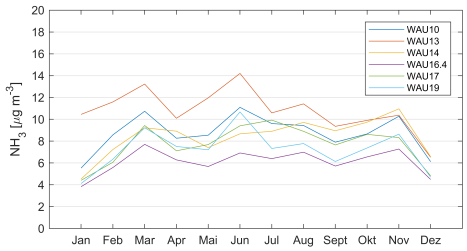


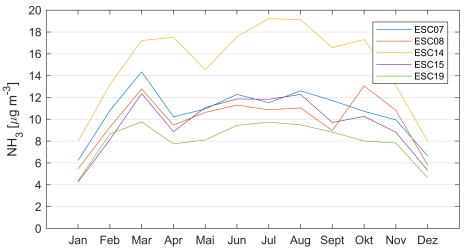


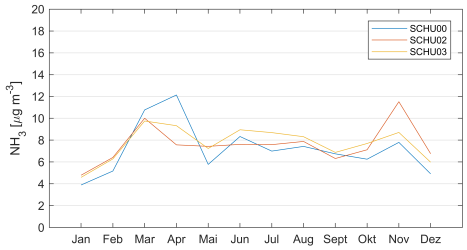


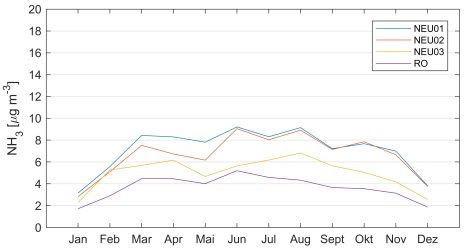

Jahresmittel NH3: Kt. Zug
FRAU
FRUE
INWI
ZIGE
ZB01
NH3 [µg m-3]
0
5
10
15
20
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021

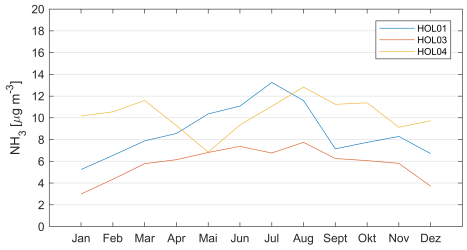
5.4 Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2017 - 2021)

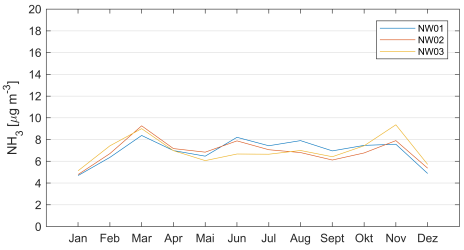


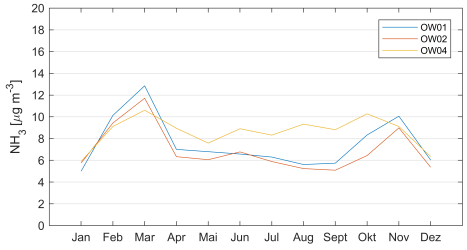


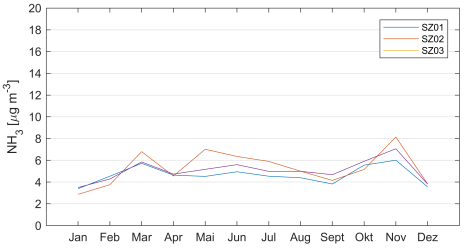


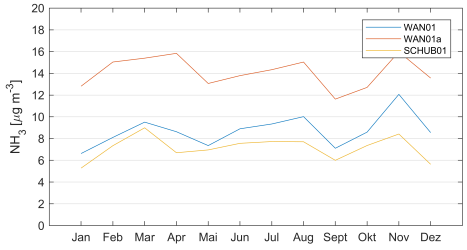


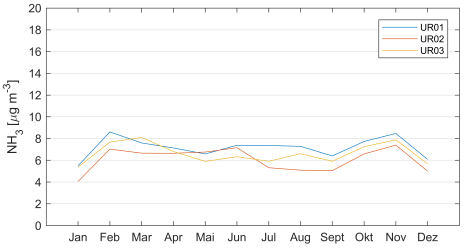


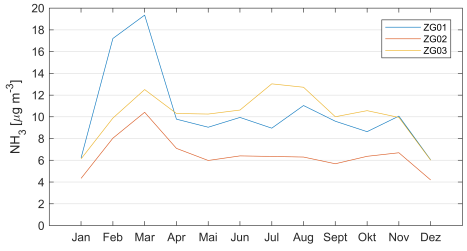


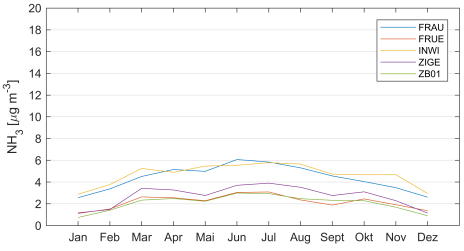








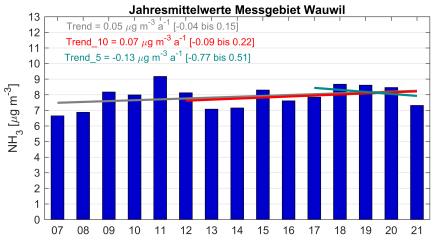




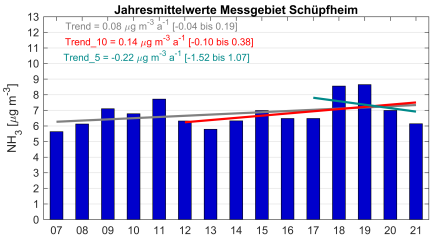
5.5 Trendberechnugen

5.5.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

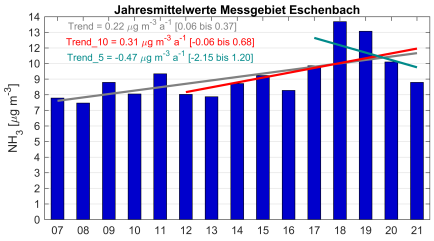
Unter den Grafiken sind jeweils die verwendeten Stationen für die Berechnung des Mittelwerts und der Trendwerte angegeben.



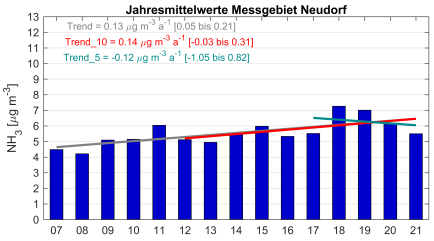
WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19



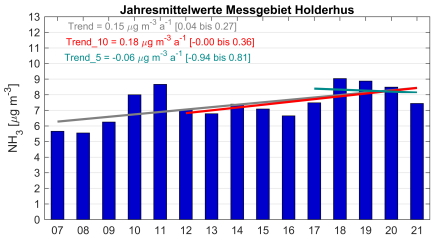
SCHU00, SCHU02



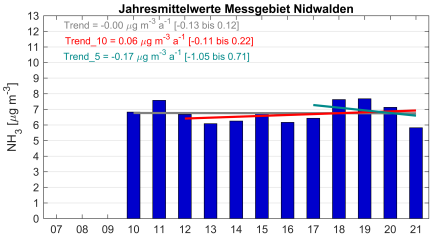
ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19



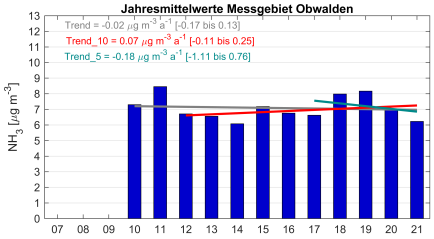
NEU01, NEU02, NEU03



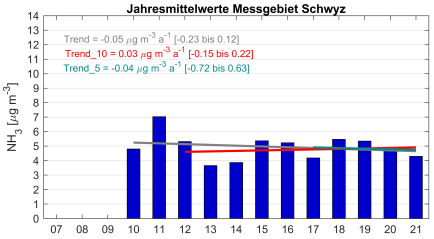
HOL01, HOL03



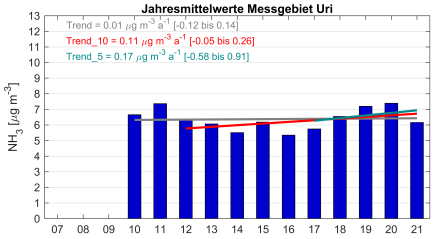
NW01, NW02, NW03



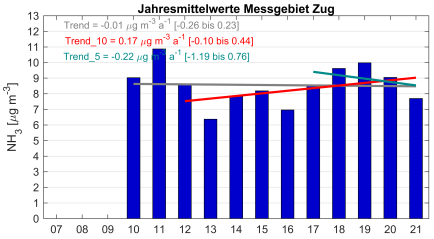
OW01, OW02



SZ01, SZ02, SZ03, SZ03a

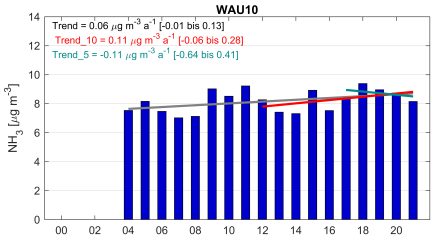


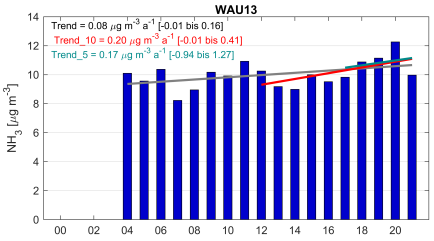
UR01, UR02, UR03

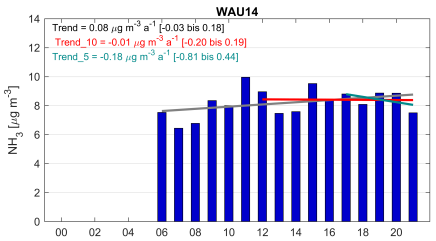


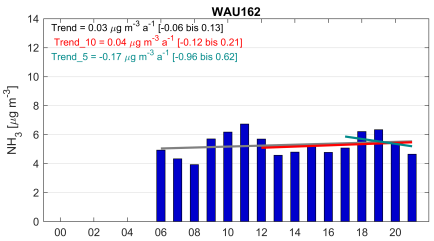
ZG02, ZG03

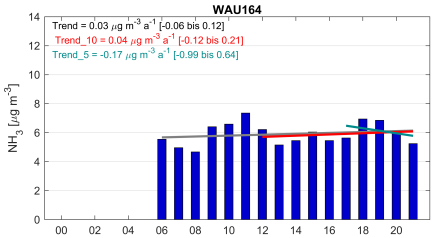
5.5.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkt

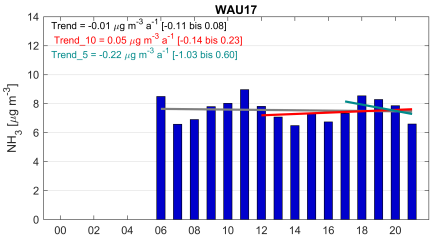


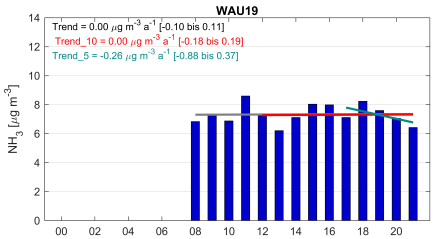


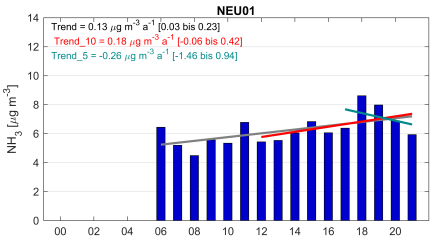


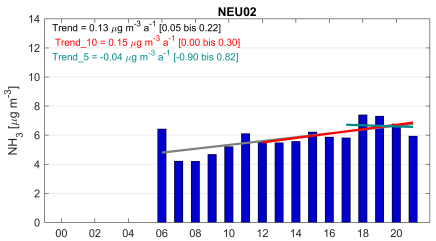


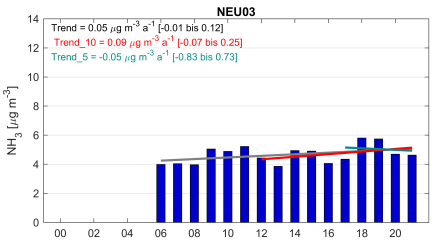


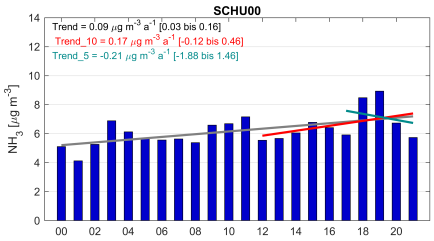


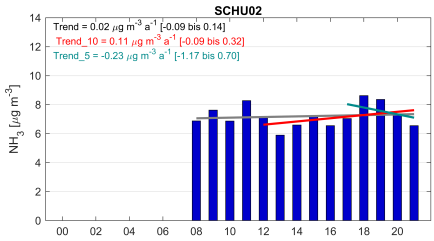


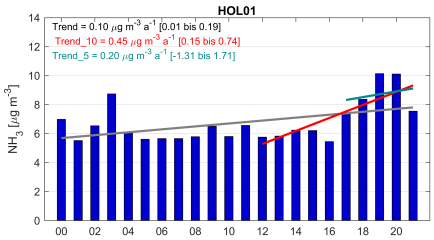


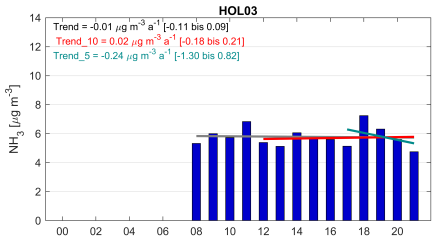


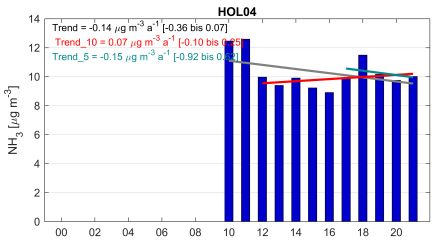


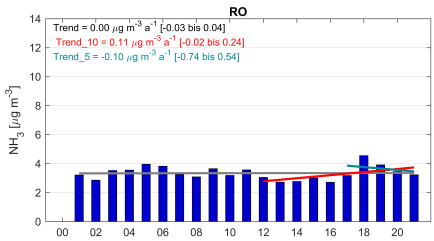

SCHU00
Trend = 0.09 µg m-3 a-1 [0.03 bis 0.16]
Trend_10 = 0.17 µg m-3 a-1 [-0.12 bis 0.46]
Trend_5 = -0.21 µg m-3 a-1 [-1.88 bis 1.46]
NH3 [µg m-3]

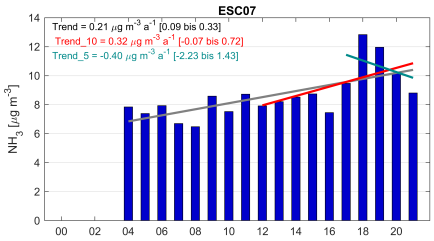

SCHU02
Trend = 0.02 µg m-3 a-1 [-0.09 bis 0.14]
Trend_10 = 0.11 µg m-3 a-1 [-0.09 bis 0.32]
Trend_5 = -0.23 µg m-3 a-1 [-1.17 bis 0.70]
NH3 [µg m-3]

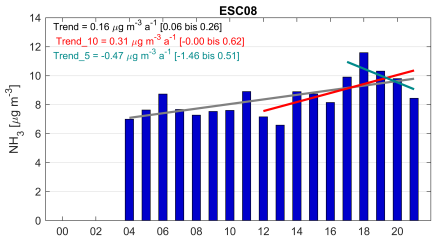

HOL01
Trend = 0.10 µg m-3 a-1 [0.01 bis 0.19]
Trend_10 = 0.45 µg m-3 a-1 [0.15 bis 0.74]
Trend_5 = 0.20 µg m-3 a-1 [-1.31 bis 1.71]
NH3 [µg m-3]

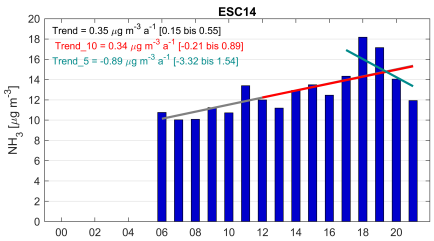

HOL03
Trend = -0.01 µg m-3 a-1 [-0.11 bis 0.09]
Trend_10 = 0.02 µg m-3 a-1 [-0.18 bis 0.21]
Trend_5 = -0.24 µg m-3 a-1 [-1.30 bis 0.82]
NH3 [µg m-3]

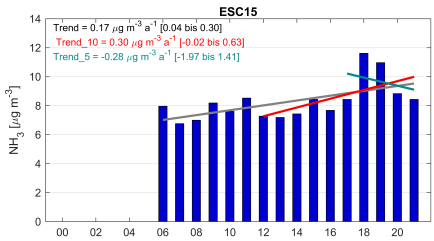

HOL04
Trend = -0.14 µg m-3 a-1 [-0.36 bis 0.07]
Trend_10 = 0.07 µg m-3 a-1 [-0.10 bis
Trend_5 = -0.15 µg m-3 a-1 [-0.92 bis
NH3 [µg m-3]

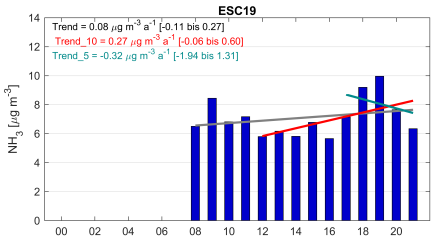

RO
Trend = 0.00 µg m-3 a-1 [-0.03 bis 0.04]
Trend_10 = 0.11 µg m-3 a-1 [-0.02 bis 0.24]
Trend_5 = -0.10 µg m-3 a-1 [-0.74 bis 0.54]
NH3 [µg m-3]

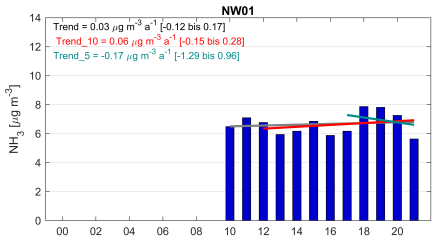

ESC07
Trend = 0.21 µg m-3 a-1 [0.09 bis 0.33]
Trend_10 = 0.32 µg m-3 a-1 [-0.07 bis 0.72]
Trend_5 = -0.40 µg m-3 a-1 [-2.23 bis 1.43]
NH3 [µg m-3]

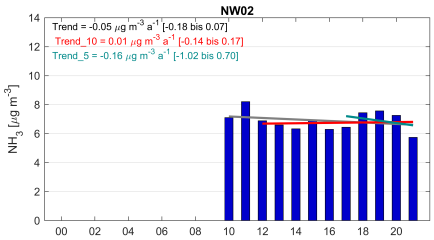

ESC08
Trend = 0.16 µg m-3 a-1 [0.06 bis 0.26]
Trend_10 = 0.31 µg m-3 a-1 [-0.00 bis 0.62]
Trend_5 = -0.47 µg m-3 a-1 [-1.46 bis 0.51]
NH3 [µg m-3]

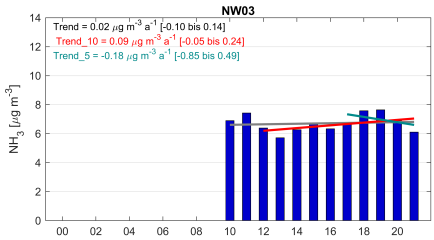

ESC14
Trend = 0.35 µg m-3 a-1 [0.15 bis 0.55]
Trend_10 = 0.34 µg m-3 a-1 [-0.21 bis 0.89]
Trend_5 = -0.89 µg m-3 a-1 [-3.32 bis 1.54]
NH3 [µg m-3]

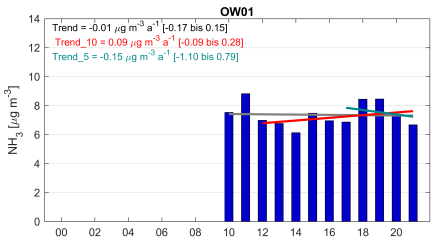

ESC15
Trend = 0.17 µg m-3 a-1 [0.04 bis 0.30]
Trend_10 = 0.30 µg m-3 a-1 [-0.02 bis 0.63]
Trend_5 = -0.28 µg m-3 a-1 [-1.97 bis 1.41]
NH3 [µg m-3]

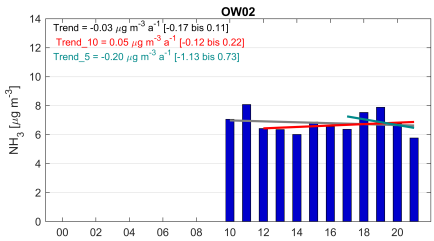

ESC19
Trend = 0.08 µg m-3 a-1 [-0.11 bis 0.27]
Trend_10 = 0.27 µg m-3 a-1 [-0.06 bis 0.60]
Trend_5 = -0.32 µg m-3 a-1 [-1.94 bis 1.31]
NH3 [µg m-3]

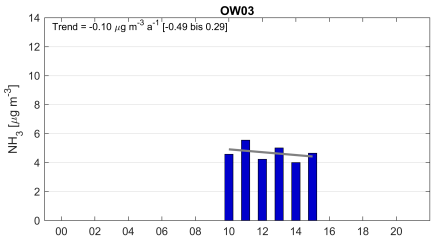

NW01
Trend = 0.03 µg m-3 a-1 [-0.12 bis 0.17]
Trend_10 = 0.06 µg m-3 a-1 [-0.15 bis 0.28]
Trend_5 = -0.17 µg m-3 a-1 [-1.29 bis 0.96]
NH3 [µg m-3]

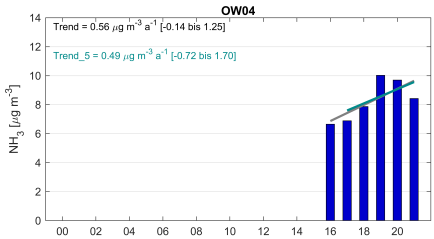

NW02
Trend = -0.05 µg m-3 a-1 [-0.18 bis 0.07]
Trend_10 = 0.01 µg m-3 a-1 [-0.14 bis 0.17]
Trend_5 = -0.16 µg m-3 a-1 [-1.02 bis 0.70]
NH3 [µg m-3]

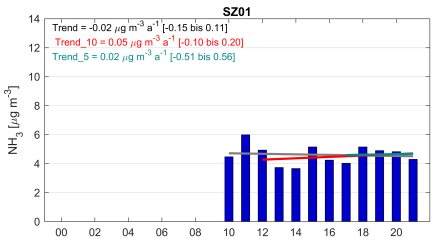

NW03
Trend = 0.02 µg m-3 a-1 [-0.10 bis 0.14]
Trend_10 = 0.09 µg m-3 a-1 [-0.05 bis 0.24]
Trend_5 = -0.18 µg m-3 a-1 [-0.85 bis 0.49]
NH3 [µg m-3]

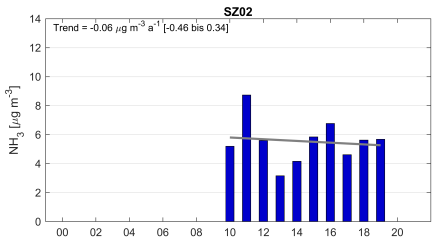

OW01
Trend = -0.01 µg m-3 a-1 [-0.17 bis 0.15]
Trend_10 = 0.09 µg m-3 a-1 [-0.09 bis 0.28]
Trend_5 = -0.15 µg m-3 a-1 [-1.10 bis 0.79]
NH3 [µg m-3]

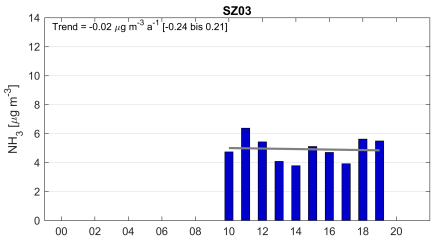

OW02
Trend = -0.03 µg m-3 a-1 [-0.17 bis 0.11]
Trend_10 = 0.05 µg m-3 a-1 [-0.12 bis 0.22]
Trend_5 = -0.20 µg m-3 a-1 [-1.13 bis 0.73]
NH3 [µg m-3]

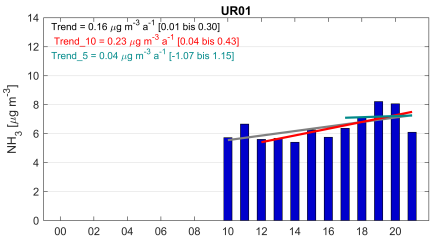

OW03
Trend = -0.10 µg m-3 a-1 [-0.49 bis 0.29]
NH3 [µg m-3]

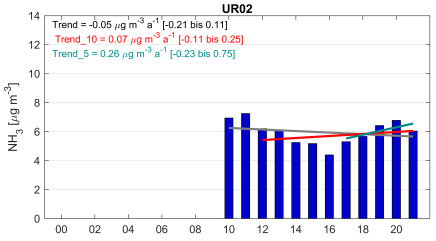

OW04
Trend = 0.56 µg m-3 a-1 [-0.14 bis 1.25]
Trend_5 = 0.49 µg m-3 a-1 [-0.72 bis 1.70]
NH3 [µg m-3]

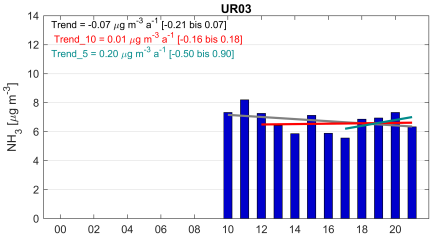

SZ01
Trend = -0.02 µg m-3 a-1 [-0.15 bis 0.11]
Trend_10 = 0.05 µg m-3 a-1 [-0.10 bis 0.20]
Trend_5 = 0.02 µg m-3 a-1 [-0.51 bis 0.56]
NH3 [µg m-3]

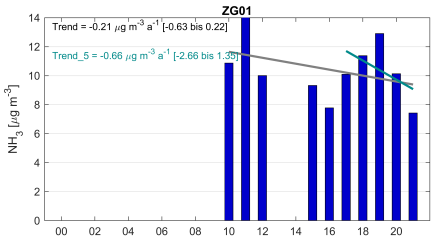

SZ02
Trend = -0.06 µg m-3 a-1 [-0.46 bis 0.34]
NH3 [µg m-3]

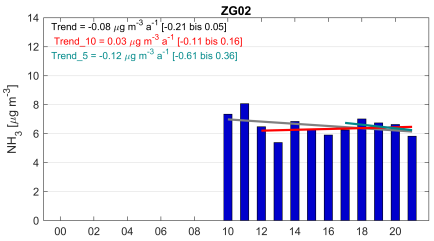

SZ03
Trend = -0.02 µg m-3 a-1 [-0.24 bis 0.21]
NH3 [µg m-3]

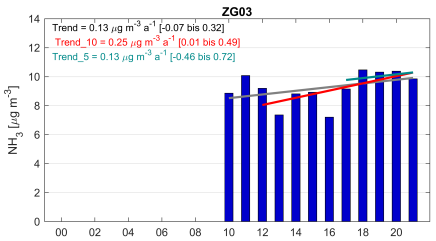

UR01
Trend = 0.16 µg m-3 a-1 [0.01 bis 0.30]
Trend_10 = 0.23 µg m-3 a-1 [0.04 bis 0.43]
Trend_5 = 0.04 µg m-3 a-1 [-1.07 bis 1.15]
NH3 [µg m-3]

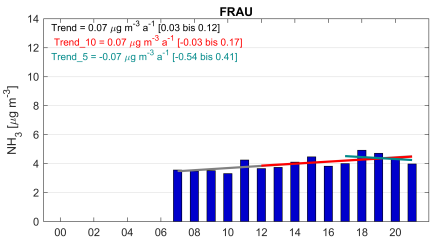

UR02
Trend = -0.05 µg m-3 a-1 [-0.21 bis 0.11]
Trend_10 = 0.07 µg m-3 a-1 [-0.11 bis 0.25]
Trend_5 = 0.26 µg m-3 a-1 [-0.23 bis 0.75]
NH3 [µg m-3]

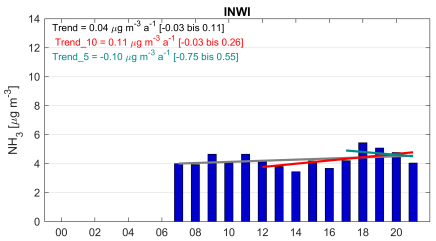

UR03
Trend = -0.07 µg m-3 a-1 [-0.21 bis 0.07]
Trend_10 = 0.01 µg m-3 a-1 [-0.16 bis 0.18]
Trend_5 = 0.20 µg m-3 a-1 [-0.50 bis 0.90]
NH3 [µg m-3]

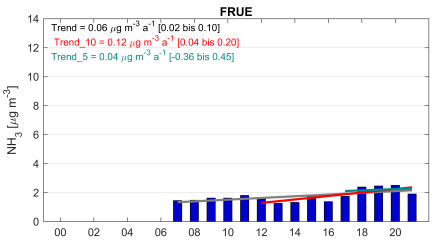

ZG01
Trend = -0.21 µg m-3 a-1 [-0.63 bis 0.22]
Trend_5 = -0.66 µg m-3 a-1 [-2.66 bis 1.35]
NH3 [µg m-3]

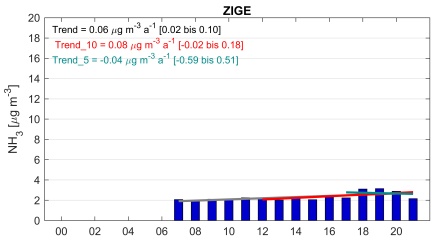

ZG02
Trend = -0.08 µg m-3 a-1 [-0.21 bis 0.05]
Trend_10 = 0.03 µg m-3 a-1 [-0.11 bis 0.16]
Trend_5 = -0.12 µg m-3 a-1 [-0.61 bis 0.36]
NH3 [µg m-3]

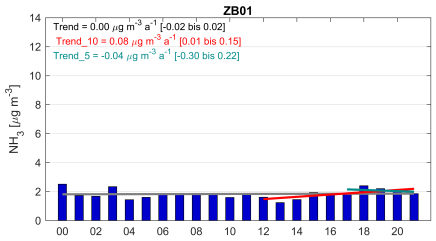

ZG03
Trend = 0.13 µg m-3 a-1 [-0.07 bis 0.32]
Trend_10 = 0.25 µg m-3 a-1 [0.01 bis 0.49]
Trend_5 = 0.13 µg m-3 a-1 [-0.46 bis 0.72]
NH3 [µg m-3]

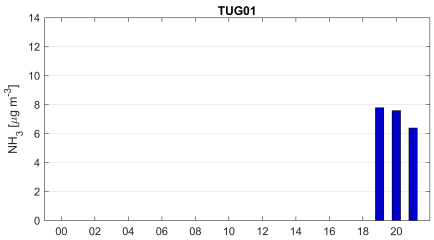

FRAU
Trend = 0.07 µg m-3 a-1 [0.03 bis 0.12]
Trend_10 = 0.07 µg m-3 a-1 [-0.03 bis 0.17]
Trend_5 = -0.07 µg m-3 a-1 [-0.54 bis 0.41]
NH3 [µg m-3]

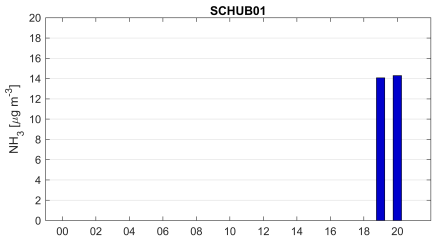

INWI
Trend = 0.04 µg m-3 a-1 [-0.03 bis 0.11]
Trend_10 = 0.11 µg m-3 a-1 [-0.03 bis 0.26]
Trend_5 = -0.10 µg m-3 a-1 [-0.75 bis 0.55]
NH3 [µg m-3]

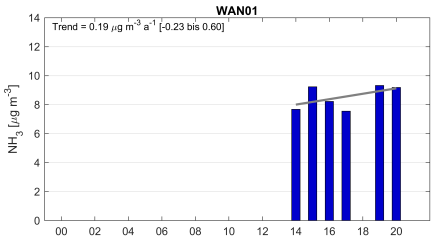

FRUE
Trend = 0.06 µg m-3 a-1 [0.02 bis 0.10]
Trend_10 = 0.12 µg m-3 a-1 [0.04 bis 0.20]
Trend_5 = 0.04 µg m-3 a-1 [-0.36 bis 0.45]
NH3 [µg m-3]


ZIGE
Trend = 0.06 µg m-3 a-1 [0.02 bis 0.10]
Trend_10 = 0.08 µg m-3 a-1 [-0.02 bis 0.18]
Trend_5 = -0.04 µg m-3 a-1 [-0.59 bis 0.51]
NH3 [µg m-3]

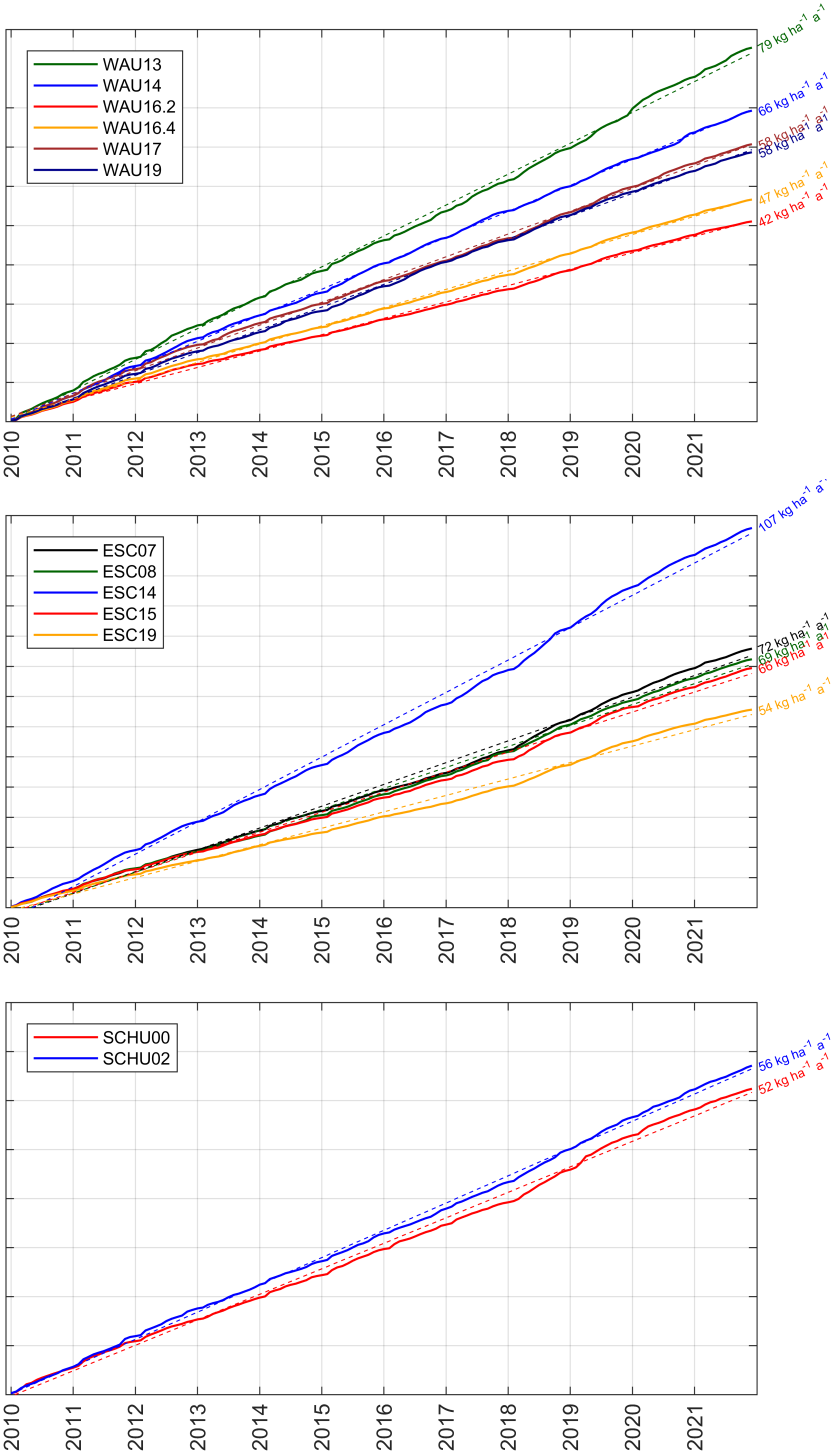

ZB01
Trend = 0.00 µg m-3 a-1 [-0.02 bis 0.02]
Trend_10 = 0.08 µg m-3 a-1 [0.01 bis 0.15]
Trend_5 = -0.04 µg m-3 a-1 [-0.30 bis 0.22]
NH3 [µg m-3]

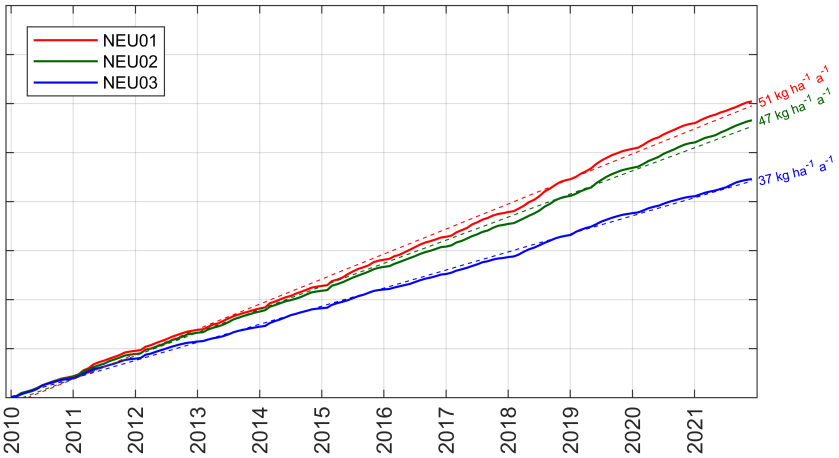

TUG01
NH3 [µg m-3]

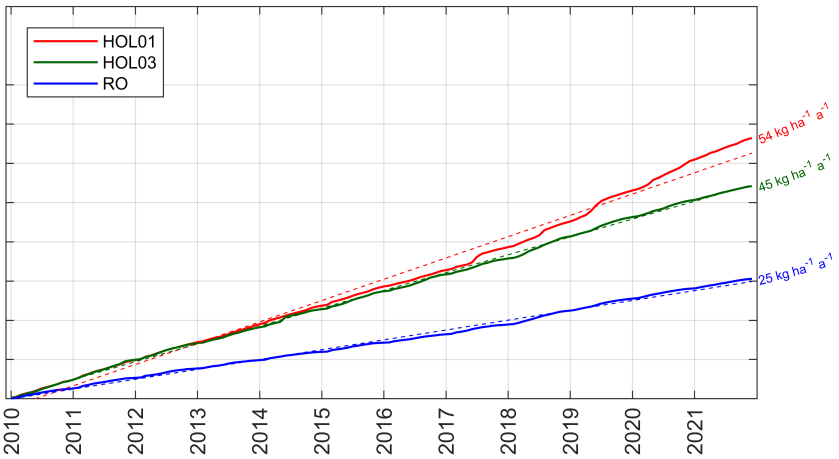

SCHUB01
NH3 [µg m-3]

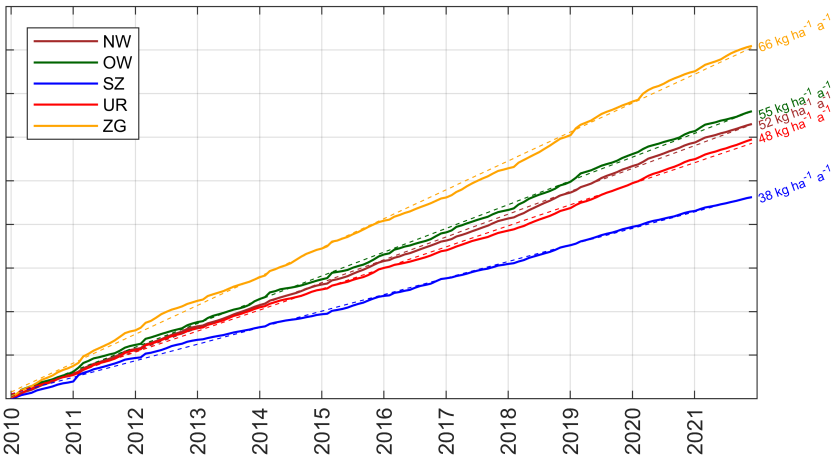

WAN01
Trend = 0.19 µg m-3 a-1 [-0.23 bis 0.60]
NH3 [µg m-3]

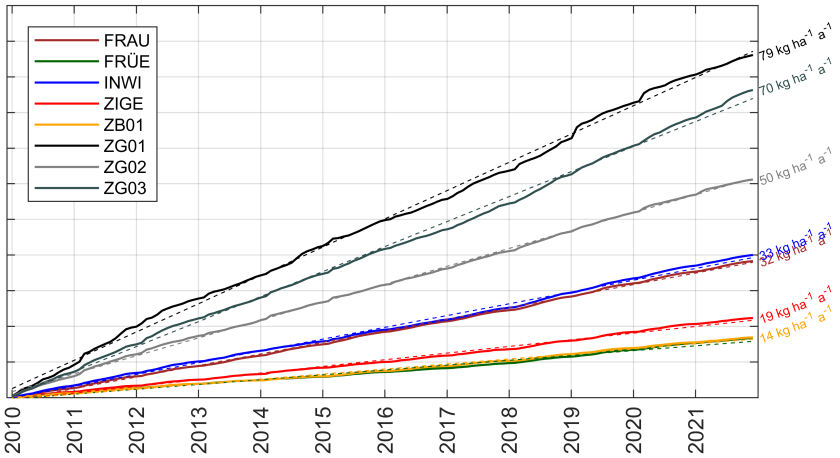
5.6 Frachten


WAU13
WAU14
WAU16.2
WAU16.4
WAU17
WAU19
79 kg ha-1 a-1
66 kg ha-1 a-1
58 kg ha-1 a-1
47 kg ha-1 a-1
42 kg ha-1 a-1
ESC07
ESC08
ESC14
ESC15
ESC19
107 kg ha-1 a-1
72 kg ha-1 a-1
69 kg ha-1 a-1
66 kg ha-1 a-1
54 kg ha-1 a-1
SCHU00
SCHU02
56 kg ha-1 a-1
52 kg ha-1 a-1
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021


NEU01
NEU02
NEU03
51 kg ha-1 a-1
47 kg ha-1 a-1
37 kg ha-1 a-1
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021


HOL01
HOL03
RO
54 kg ha-1 a-1
45 kg ha-1 a-1
25 kg ha-1 a-1
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021


NW
OW
SZ
UR
ZG
66 kg ha-1 a-1
55 kg ha-1 a-1
52 kg ha-1 a-1
48 kg ha-1 a-1
38 kg ha-1 a-1
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021



5.7 Anmerkungen zur statistischen Analyse

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

$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * x_i + \epsilon_i$ mit i = 1,...,n und die zufälligen Fehler ϵ_1 ,..., $\epsilon_i \sim$ N(0, σ^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-α) liegt. Um einen auf Niveau α statistisch signifikanten Trend zu zeigen, müssen beide Grenzen dieses Intervalls auf einer Seite der 0 liegen. Deshalb wird im Bericht das 95-%-Vertrauensintervall des linearen Trends in eckigen Klammern aufgelistet. Daraus lässt sich somit direkt die Signifikanz ablesen. Das Vertrauensintervall für die Steigung hängt von der erwarteten Steigung, den Freiheitsgraden (d.h. Anzahl Messungen), dem gesetzten Signifikanzniveau und dem Standardfehler ab.

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