



Messbericht Ammoniak

**Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz
von 2000 bis 2020**

Autoren

Hannah Wey
Christian Ruckstuhl



UMWELTFACHSTELLEN

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.

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 wird diese zusätzlich in Ausserschwyz an einem Messpunkt erhoben. Die Messgebiete liegen teils in Landwirtschaftszonen und gleichzeitig in der näheren Umgebung von ökologisch sensiblen 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 - 2020) den Critical Level** von $3 \mu\text{g m}^{-3}$ in 13 von 17 Messgebieten **zum Teil sehr deutlich**. Über alle Messgebiete gerechnet beträgt der Faktor 1.75. Selbst wenig belastete Messpunkte in der Nähe empfindlicher Ökosysteme (Zigerhüttli, Fruebüel und Zugerberg) zeigen im mehrjährigen Jahresmittel eine Überschreitung des Critical Levels von $1 \mu\text{g m}^{-3}$ 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, Schüpffheim und Holderhus ($+0.28 / +0.16 / +0.12 / +0.16 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$). Die Messgebiete des Zentralschweizer Ressourcenprojekts mit Daten ab 2010 zeigen **langfristig gleichbleibende und rückläufige Tendenzen**, womit kein Messgebiet eine statistisch signifikante Abnahme der Ammoniakkonzentration zeigt. Der 5-Jahres-Trend ist bei diesen fünf Messgebieten positiv, wobei aber nur der Trend im Messgebiet Uri statistisch signifikant ist. 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 neuerdings auch Fruebüel verzeichnen langfristig eine statistisch signifikante Zunahme ($+0.09 / +0.08 / +0.07 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$).

In früheren Jahren zeigten die Ammoniakimmissionen im Jahresgang eine deutliche **Saisonalität** mit je einem Peak im Frühling und Herbst. Der Jahresverlauf 2020 ist ebenfalls durch einen ausgeprägten Frühlingspeak charakterisiert. Im Gegensatz zu 2018 und 2019 sanken die Konzentrationen im Frühsommer aber leicht. Die Sommerpeaks sind unterschiedlich ausgeprägt, die Herbstpeaks gar nicht bis schwach. Somit wurden 2020 wiederum hohe Ammoniakkonzentrationen gemessen. Allerdings sind diese an den meisten Messpunkten leicht tiefer als in den zwei Vorjahren. **Damit werden mehrjährige negative Trends, also eine langfristige Abnahme der Konzentration, abgeschwächt und positive verstärkt**. Diese Beobachtung kann unter anderem mit der aussergewöhnlichen meteorologischen Situationen in den letzten drei Jahren erklärt werden: Die hohen Temperaturen, kombiniert mit langen Trockenphasen, führten in den warmen Monaten zu einer verstärkten Ammoniakbildung und einer längeren Verweilzeit in der Atmosphäre, was in einem höheren Jahresmittel resultiert. 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 die Gülle trotz der anhaltenden warmen Trockenheit ausgebracht haben. Weiter zeigt eine Auswertung der Tierzahlen im Perimeter der hier gezeigten Messungen im Kanton Luzern, dass die Grossvieheinheiten stabile bis steigende Tendenzen aufweisen, was dem Reduktionsziel nicht zuträgt.

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	Richtwerte und Beurteilung	6
1.2	Übersicht Messungen in der Zentralschweiz	7
1.3	Messperioden aller Messpunkte	9
1.4	Messunsicherheit der Passivsammler	11
2	NH₃-Belastung	12
2.1	Mittlerer Jahresgang	12
2.2	Mehrjahresmittelwerte	14
2.3	Verlauf der Ammoniakkonzentration	16
2.4	Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung	20
3	Trendanalyse	21
3.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	21
3.2	Jahresmittel-Trends nach Messpunkten	24
3.3	Stickstofffrachten durch Ammoniak	26
3.4	Einfluss der Meteorologie auf NH ₃ -Trends	30
3.5	Einfluss der Tierzahlen auf NH ₃ -Trends	31
4	Diskussion	32
5	Anhang	33
5.1	Detaillierte Standortbeschreibungen	33
5.1.1	Wauwil, Luzern	33
5.1.2	Eschenbach, Luzern	34
5.1.3	Neudorf, Luzern	34
5.1.4	Schüpfheim, Luzern	35
5.1.5	Holderhus, Luzern	35
5.1.6	Root Michaelskreuz, Luzern	36
5.1.7	Nidwalden	36
5.1.8	Obwalden	37
5.1.9	Uri	37
5.1.10	Schwyz	38
5.1.11	Zug	39
5.1.12	Rigi-Seebodenalp (NABEL)	40
5.2	Charakterisierung der Messpunkte	41
5.3	Mittlerer Jahresgang der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten	43
5.4	Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2010 - 2020)	44
5.5	Trendberechnungen	45
5.5.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	45
5.5.2	Jahresmittel-Trends nach Messpunkt	46
5.6	Frachten	50
5.7	Tierzahlen	53
5.8	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 $300 \text{ CO}_2\text{-eq}$.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 93 % zu den gesamten Ammoniakemissionen bei (Jahr 2015). Dabei entstehen die Emissionen durch Tierhaltung hauptsächlich beim Ausbringen von Gülle und Mist (46 %), in Stall und Laufhof (34 %) sowie beim Lagern von Dünger (16 %).³

Im Jahr 2020 betragen die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft landesweit 50.3 kt (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 sowie einer Erhöhung der Produktivität.

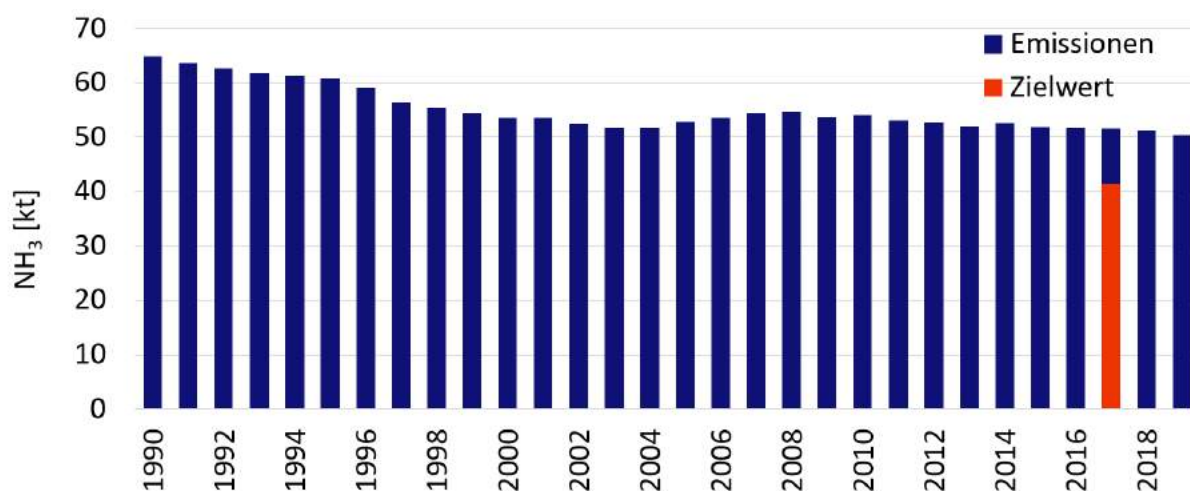


Abbildung 1: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft in der Schweiz von 1990 bis 2019.⁵ Der rote Balken zeigt den vom BAFU kommunizierten Zielwert für 2017.

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

¹<https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials>

²<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/stickstoffhaltige-luftschadstoffe-beeintraechtigen-auch-die-biod.html> [Stand: 26.06.2019]

³Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Bonjour Engineering GmbH, METEOTEST, Oetiker+Partner AG (2013): Ammoniakemissionen in der Schweiz 1990-2010 und Prognose bis 2020.

⁴Bass, 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.

⁵Bass, 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

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 haben sich positiv auf dieses Projektziel ausgewirkt. Es sind dies die Pakete «Aufhebung der allgemeinen Tierbeiträge», «Einführung HODUFLU»⁶ und «Einführung Ressourceneffizienzbeiträge für emissionsarme Ausbringtechniken»⁷. 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.

Der Eintrag von Stickstoff durch Ammoniakemissionen in die Umwelt ist gross. Eine Studie im Auftrag des BAFU zeigte, dass diese Stickstoffeinträge in naturnahe Wiesen, Wälder und Moore der Schweiz vielerorts zu hoch sind.⁸ Bei mehr als 90 % der Waldökosysteme und bei rund 70 % der (halb)natürlichen Ökosysteme wurden im Jahr 2010 die Critical Loads für Stickstoff überschritten.⁹ Der gesamtschweizerische Ammoniak-Immissionsmessbericht kommt weiter zum Schluss, dass die Ammoniakkonzentrationen seit dem Jahr 2000 weder zu- noch abgenommen haben (Abbildung 2).¹⁰

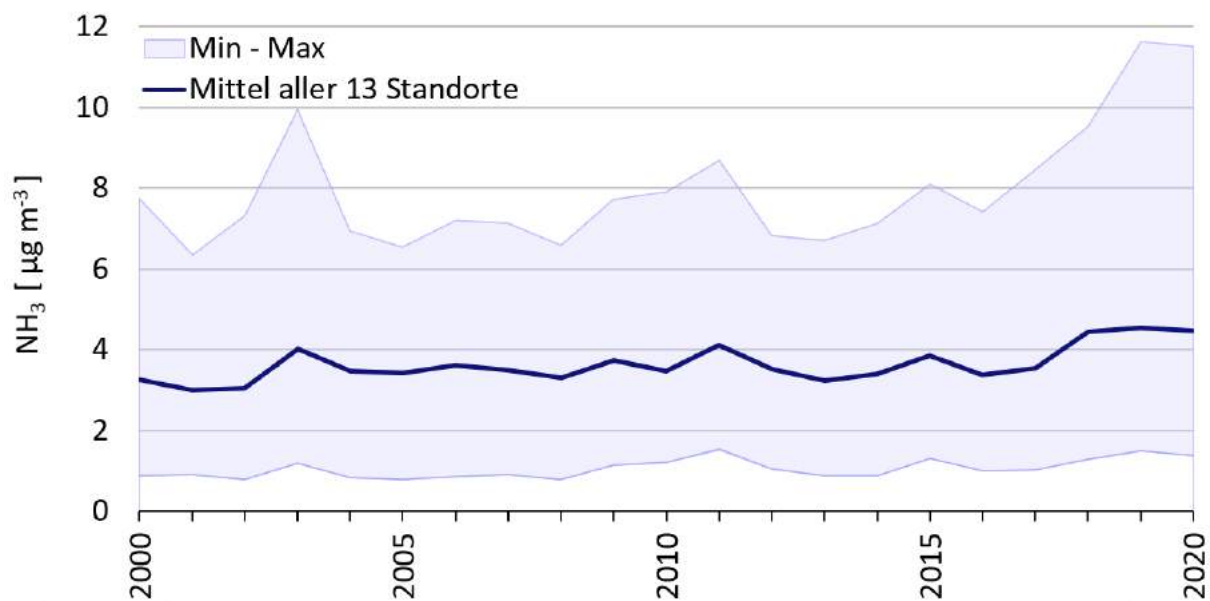


Abbildung 2: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen von 13 Immissions-Messstandorten in der Schweiz, an denen seit 2000 durchgehend gemessen wird.

⁶HODUFLU ist ein Internetprogramm zur einheitlichen Verwaltung von Hof- und Recyclingdüngerverschiebungen in der Landwirtschaft.

⁷BAFU und BLW (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114 S.

⁸Seitler et al. (2016): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB-Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 105 S.

⁹Rihm, 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.

¹⁰Seitler, E. und Meier, M.(2021). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2020. Messbericht.

1.1 Richtwerte und Beurteilung

Zur Beurteilung der Stickstoffeinträge stehen Critical Loads und Critical Levels der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)¹¹ zur Verfügung. Critical Loads bezeichnen die Deposition bzw. Gesamtstickstofffrachten, 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 NH₃ m⁻³ für empfindliche Moose und Flechten sowie die damit assoziierten Ökosysteme
- 3 µg NH₃ m⁻³ für höhere Pflanzen mit einem Unsicherheitsbereich von 2 – 4 µg m⁻³

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) ist der Frage nachgegangen, ob es Sinn macht, einen Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der Luftreinhalteverordnung (LRV) festzulegen.¹² 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 ein Viertel zur gesamten Ammoniakkonzentration bei. „Regionale“ Quellen, d. h. Quellen im Abstand von 1 bis 4 km zu den untersuchten Ökosystemstandorten, machen etwa die Hälfte der Immissionen aus.

Als Empfehlungen wurden folgende Punkte formuliert:

- Es soll kein Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der LRV festgelegt werden. Der Stellenwert der Critical Loads für Stickstoff soll dagegen gestärkt werden. Zur Beurteilung der Übermässigkeit 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.

¹¹UNECE (2007). Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts. ECE/EB.Air/WG.5/2007/3

¹²Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (2014). Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Bern

1.2 Übersicht Messungen in der Zentralschweiz

In allen Messnetzen sind jeweils an jedem Messpunkt zwei oder drei Passivsammlerröhrchen in einem Wetter-schutzgehäuse montiert (Abbildung 3). 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.¹³ In den Folgejahren wurden gemeinsame Ammoniak-Messberichte für die Zentralschweiz verfasst.¹⁴
¹⁵ ¹⁶ ¹⁷ ¹⁸ ¹⁹ ²⁰ Im vorliegenden Bericht werden im Auftrag der Zentralschweizer Umweltfachstellen (ZENTRUM, vorgängig ZUDK) die Ammoniak-Messdaten der gesamten Zentralschweiz bis Ende 2020 im Rahmen des Basisleistungsauftrags (BLA) inLUFT ausgewertet.

Im Kanton Luzern sind insgesamt sechs Messgebiete vorhanden. In jedem Messgebiet gibt es mehrere Messpunkte (Abbildung 4). 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 Messpunkten gemessen. Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Kantonzugehörigkeit benannt (z. B. Messgebiet Uri). Meist wird auf «Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz» verwiesen.

Zusätzlich betreibt der Kanton Zug seit 2007 ein kantonales Ammoniakmessnetz mit vier Messgebieten (Abbildung 4). Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit benannt (z. B. Messgebiet/Messpunkt Zugerberg), meist wird auf «kantonale Passivsammler im Kanton Zug» hingewiesen.



Abbildung 3: Ein Ferm-Passivsammler im Einsatz.²¹

¹³Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2012). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen Kanton Luzern 2000 bis 2011. inNET Monitoring AG.

¹⁴Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2013). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2012. inNET Monitoring AG.

¹⁵Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2014). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2013. inNET Monitoring AG.

¹⁶Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2016). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2015. inNET Monitoring AG.

¹⁷Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2017). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2016. inNET Monitoring AG.

¹⁸Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2018). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2017. inNET Monitoring AG.

¹⁹Wey, H., Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2019). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2018. inNET Monitoring AG.

²⁰Wey, H., Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2020). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2019. inNET Monitoring AG.

²¹Fotos von E. Seitler, FUB

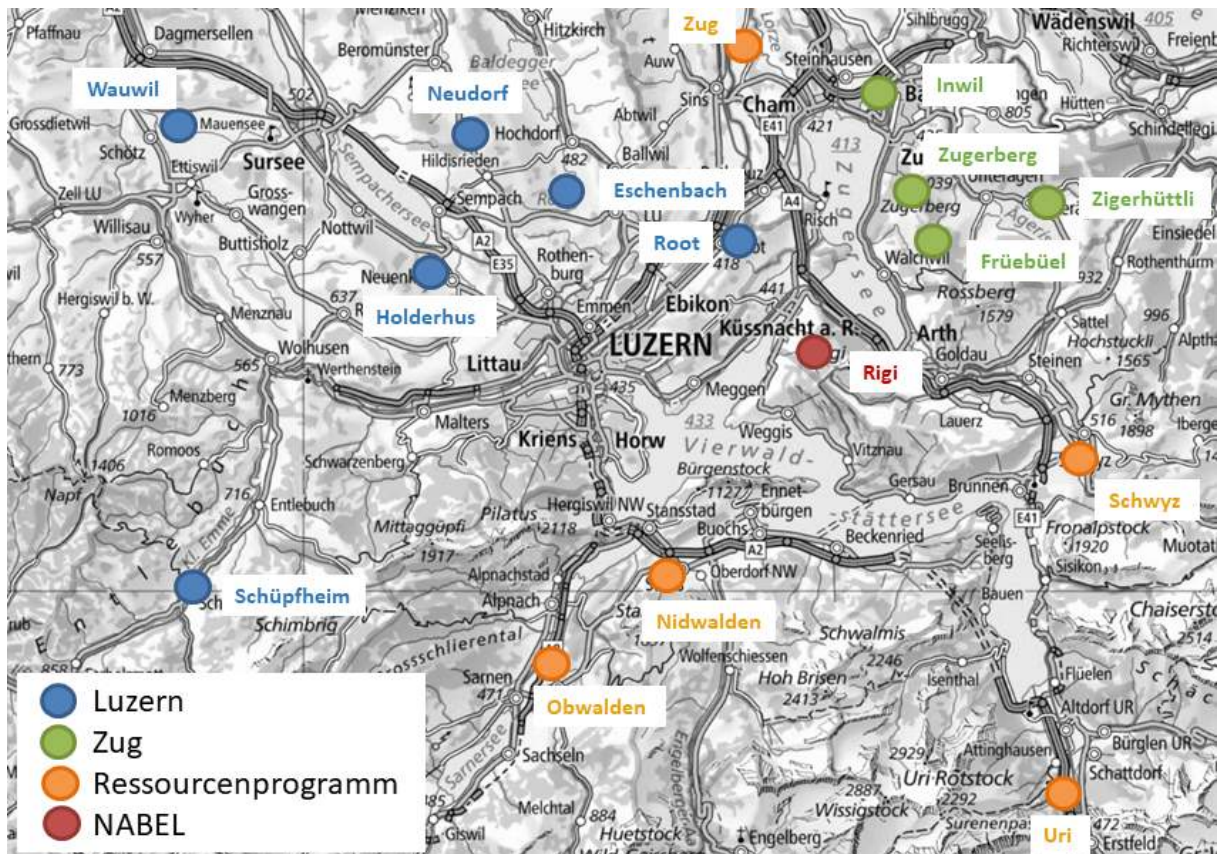


Abbildung 4: Gesamtübersicht der Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz: Die Punkte stehen entweder für Messgebiete, in welchen in der Regel mehrere Messpunkte vorhanden sind, oder für einzelne Messpunkte.

1.3 Messperioden aller Messpunkte

Abbildung 5 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.

Wie in Abbildung 5 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.

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

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.²²

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.

Anfang 2020 wurde der Messpunkt SZ-02 aufgegeben und SZ-03 wegen wiederholtem Vandalismus verschoben. Der Mittelwert dieses Messgebiets ab 2020 besteht deshalb aus den Messwerten von SZ-01 und SZ-03a.

²²Seitler, E., Thöni, L., Schnyder, R., Rihm, B. (2013): Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz, Beschreibung der Standorte und Daten. FUB.

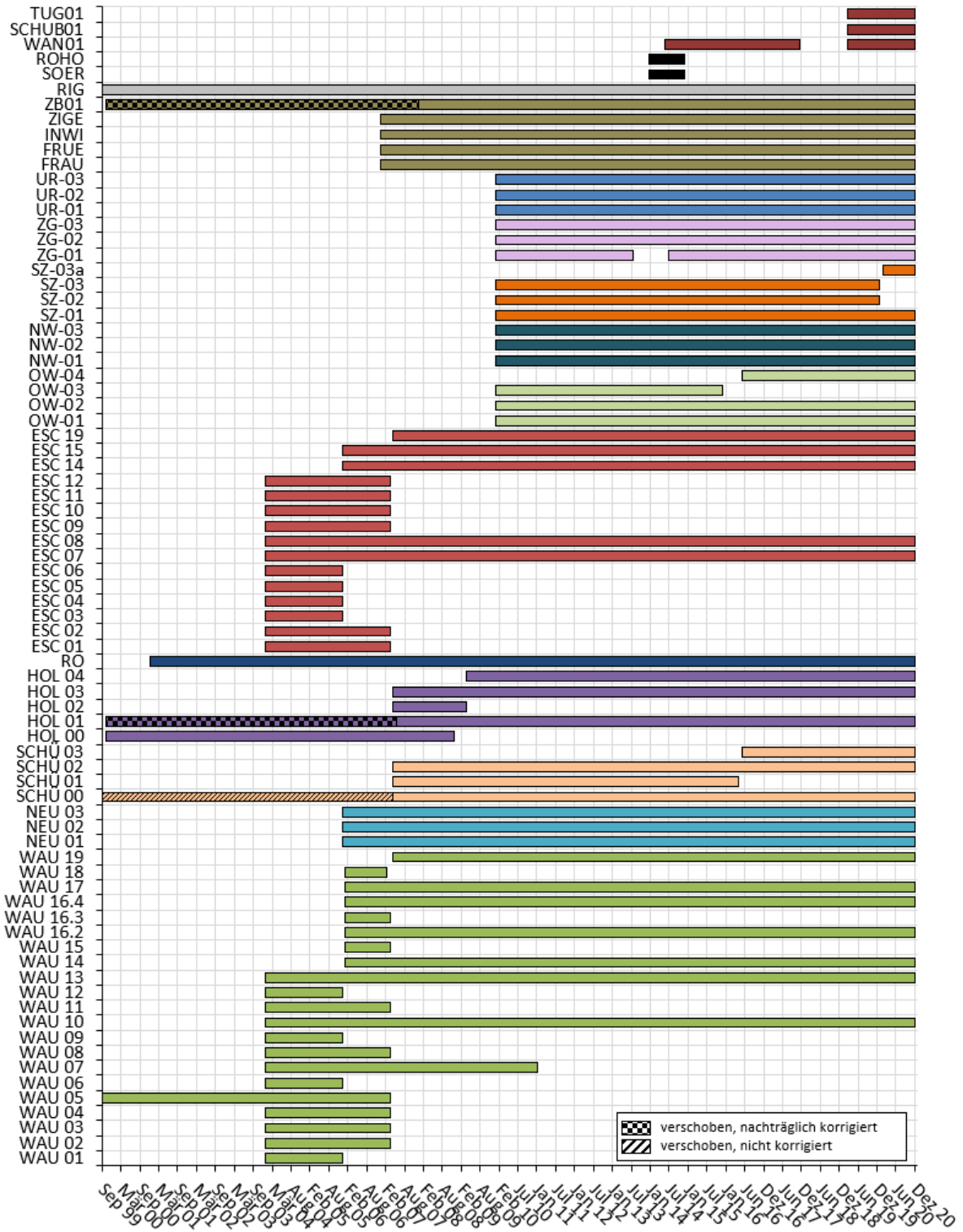


Abbildung 5: Zeitliche Übersichtstafel aller Messpunkte in der Zentralschweiz, farblich unterteilt in die verschiedenen Messgebiete.).²³

²³Die Umrechnung für die HOL01-Werte vor 2007 wurde durch eine Parallelmessung mit HOL00 ermittelt: $HOL01 = HOL00 * 0.98 + 0.90$ ($R^2 = 0.95$). Die Umrechnung für die ZB01-Werte vor 2008 wurde durch eine Parallelmessung mit ZB00 ermittelt: $ZB01 = ZB00 * 1.05$ ($R^2 = 0.97$)

1.4 Messunsicherheit der Passivsammler

Die Messung der Ammoniakkonzentration erfolgte in früheren Berichten über Radiello-Sammler, seit dem Jahreswechsel 2018/2019 mittels Fern-Passivsammlern. Ein Vergleich zwischen den beiden Messmethoden ist in Seitler & Meier (2020) ersichtlich.²⁴ 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 $0.6 \mu\text{g m}^{-3}$ im Jahresmittel ermittelt.²⁵ 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 $0.9 \mu\text{g m}^{-3}$ auseinanderliegen.²⁶ Daraus kann eine Unsicherheit (90 %-Bereich) von $0.17 \mu\text{g m}^{-3}$ für einen Jahresmittelwert abgeleitet werden.

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

²⁴Seitler, E. und Meier, M. (2020). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2019. Messbericht. Abbildung 48, Seite 61.

²⁵Dämmgen, 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.

²⁶Bucher, P. (2010). Ammoniak-Messbericht. Ammoniak-Messnetz Kanton Luzern, Ergebnisse 2000 bis 2009, uwe Luzern

2 NH₃-Belastung

2.1 Mittlerer Jahresgang

Der mittlere Jahresgang wird hier beispielhaft anhand der Messpunkte von Obwalden und der kantonalen Messpunkte von Zug dargestellt (Abbildung 6). Die Grafiken der Jahresgänge der übrigen Messpunkte sind im Anhang aufgeführt.

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 geringerer Mächtigkeit die Konzentrationen in der Umgebung stärker beeinflussen, als durch am Tage emittierte Frachten, die sich durch atmosphärische Turbulenzen eher verdünnen. Trotz dieser komplexen Beziehung zwischen Emissionen und Immissionen können Vermutungen über die Ursachen der typischen Jahresgangkurven aufgestellt werden.

Die Messungen in Zug und Obwalden zeigen, dass diese Messpunkte mit intensiver Tierhaltung einen deutlichen Höchstwert im März zeigen (Abbildung 6). Bei einigen Messpunkten sind, wenn auch in geringerer Masse, nochmals erhöhte Werte im November zu beobachten. Der bei allen Messpunkten zu beobachtende «Peak» im Frühling 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.

Der bei einigen Messpunkten zu beobachtende kleinere «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 Weidewirtschaft zeigen keinen bis nur einen sehr schwach ausgeprägten Frühjahres- und Herbstpeak, was für diese Hypothesen spricht (Abbildung 6). Ausserdem zeigen diese Messpunkte teilweise eine kleinere Grundbelastung zwischen Mai und August.

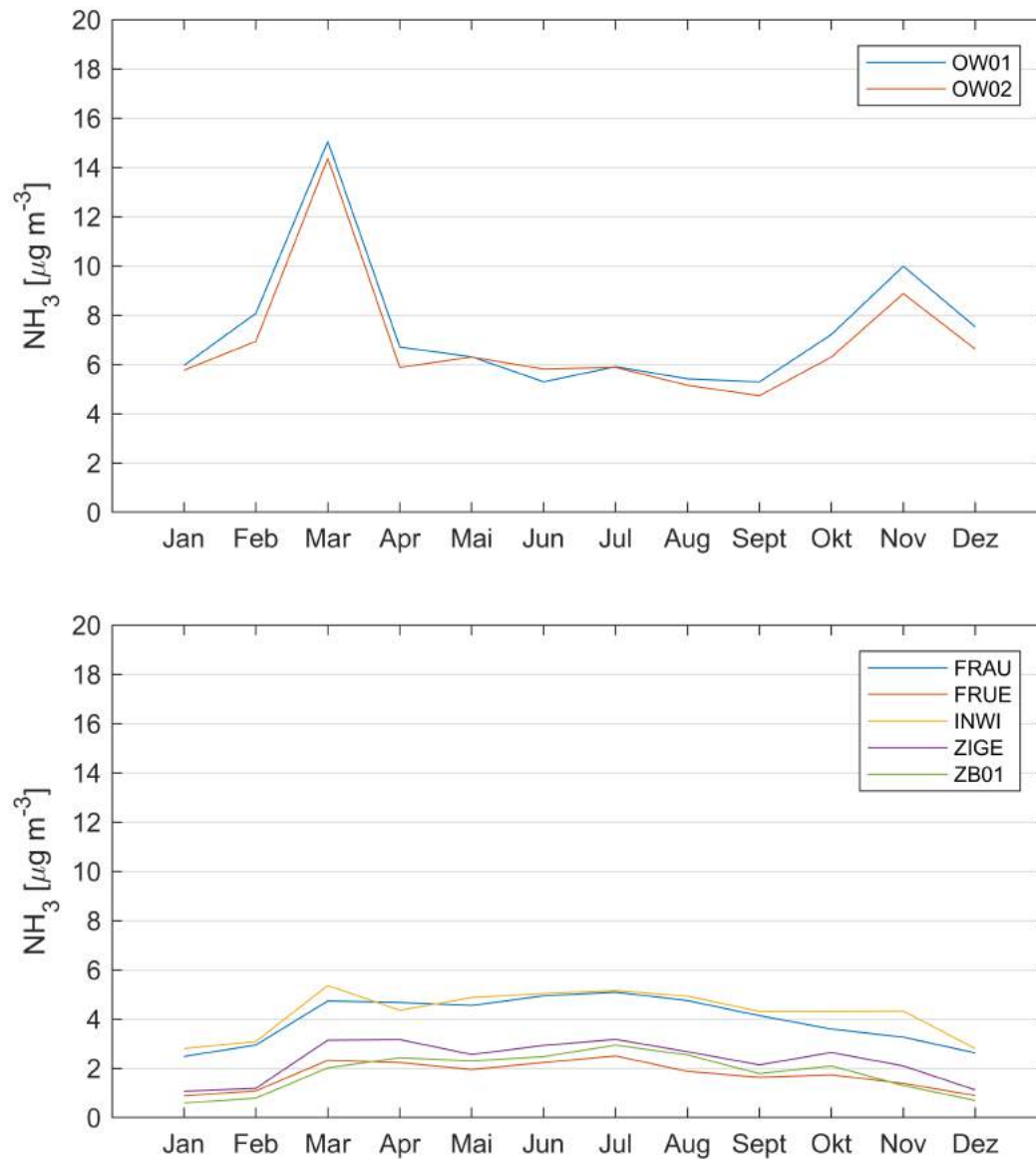


Abbildung 6: Vergleich des Jahresgangs unterschiedlicher Messpunkte mit unterschiedlicher Bewirtschaftung bzw. unterschiedlich intensiver Tierhaltung. Mittelung von 2010 bis 2020. Oben: Messpunkte von Obwalden. Unten: Messpunkte des Kantons Zug.

2.2 Mehrjahresmittelwerte

Tabelle 1 und Abbildung 7 zeigen die mehrjährigen Jahresmittel der Ammoniakkonzentration der verschiedenen Messgebiete.^{27 28} Die Jahresmittel der Ammoniak-Konzentrationen ausgewählter Messpunkte über die jeweilige Messperiode sind auch im Anhang eingefügt. Der Critical Level von $3 \mu\text{g m}^{-3}$ (für höhere Pflanzen) wurde in den meisten Messgebieten in den letzten Jahren überschritten. Dabei sind massive Überschreitungen des Critical Levels um den Faktor 2 bis 3 üblich.

Tabelle 1: Mehrjahresmittelwerte (2010 - 2020) inkl. Standardabweichung der Ammoniakkonzentration in den verschiedenen Messgebieten.

Messgebiet	Mittlere NH_3 -Konzentration
Wauwil (WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19)	$8.1 \pm 0.8 \mu\text{g m}^{-3}$
Eschenbach (ESC07, ESC08, ESC14, ESC15, ESC19)	$9.5 \pm 0.9 \mu\text{g m}^{-3}$
Holderhus (HOL01, HOL03)	$6.5 \pm 1.0 \mu\text{g m}^{-3}$
Schüpfheim (SCHÜ00, SCHÜ02)	$7.0 \pm 1.6 \mu\text{g m}^{-3}$
Root, Michaelskreuz (RO)	$3.3 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-3}$
Neudorf (NEU01, NEU02, NEU03)	$5.8 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-3}$
Nidwalden (NW-01, NW-02, NW-03)	$6.8 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-3}$
Obwalden (OW-01, OW-02)	$7.2 \pm 0.7 \mu\text{g m}^{-3}$
Schwyz (SZ-01, SZ-02, SZ-03, SZ-03a))	$5.0 \pm 0.9 \mu\text{g m}^{-3}$
Uri (UR-01, UR-02, UR-03)	$6.4 \pm 0.8 \mu\text{g m}^{-3}$
Zug (ZG-02, ZG-03)	$7.9 \pm 0.7 \mu\text{g m}^{-3}$
Kloster Fraental (FRAU)	$4.1 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-3}$
Frübüel (FRÜE)	$1.8 \pm 0.5 \mu\text{g m}^{-3}$
Inwil (INWI)	$4.3 \pm 0.5 \mu\text{g m}^{-3}$
Zigerhüttli (ZIGE)	$2.4 \pm 0.4 \mu\text{g m}^{-3}$
Zugerberg 1 (ZB01)	$1.8 \pm 0.3 \mu\text{g m}^{-3}$
Rigi-Seebodenalp (RIGI)	$1.5 \pm 0.3 \mu\text{g m}^{-3}$

²⁷ Ab 2016 ist bei den Messgebieten Schüpfheim und Obwalden je ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (SCHÜ01 und OW-03), da diese Messpunkte aufgehoben wurden.

²⁸ Ab 2020 wird die mittlere Konzentration des Messgebiets Schwyz aus SZ-01 und neu SZ-03a gebildet, weil die Messpunkte SZ-02 und SZ-03 aufgegeben wurden.

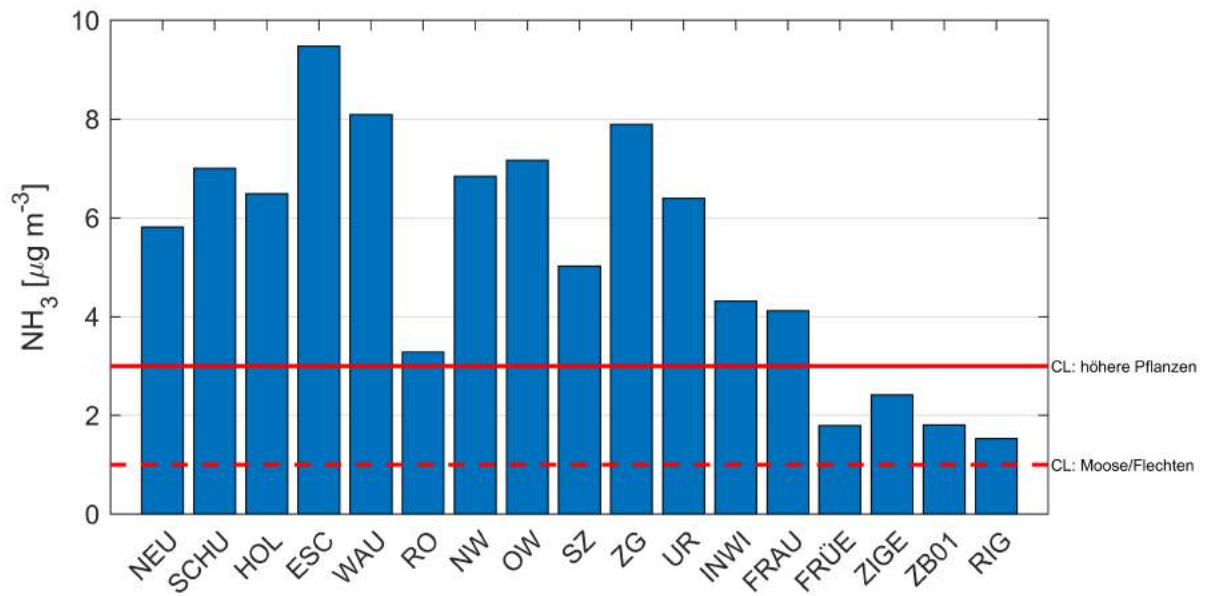


Abbildung 7: Mehrjähriges Mittel (2010 - 2020) der Ammoniakkonzentration in den einzelnen Messgebieten. Die rote ausgezogene Linie kennzeichnet den Critical Level (CL) für höhere Pflanzen, die rote gestrichelte Linie denjenigen für empfindliche Moose und Flechten.

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 8). Die drei kantonalen Messpunkte Frübüel, Zugerberg und Zigerhüttli (FRÜE, ZB01 und ZIGE) sind in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen, weshalb dort der strengere Critical Level-Wert für Moose und Flechten von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ angewendet werden soll. Dieser wird an all diesen drei Messpunkten und in allen Jahren überschritten.

Im Jahr 2020 wurden auf hohem Niveau leicht tiefere (ZB01, ZIGE, FRAU, INWI, ZG02) bis vergleichbare (FRÜE, ZG03) Ammoniakkonzentrationen als 2018 und 2019 gemessen. Bei FRÜE ist dies jedoch die höchste Jahresmittelkonzentration seit Messbeginn, bei ZG03 die zweithöchste nach 2018. Bei ZG01 ist der Rückgang im Vergleich zu den beiden vorhergehenden Jahren etwas stärker.

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. 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.

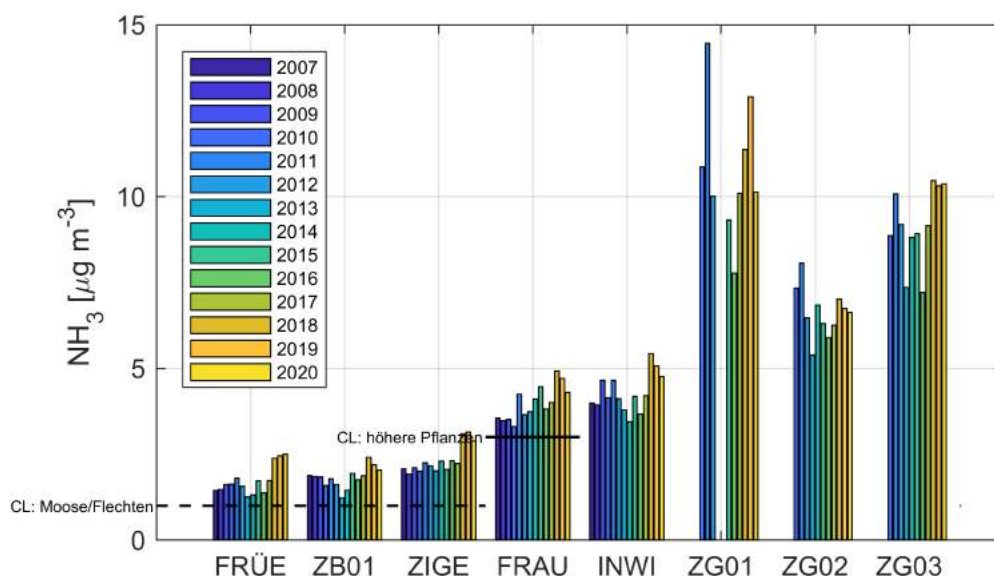


Abbildung 8: Jahresmittel (2007 bis 2020) der Ammoniakkonzentration an den einzelnen Messpunkten im Kanton Zug. Dies beinhaltet sowohl die kantonalen Messpunkte (FRÜE, ZB01, ZIGE, FRAU, INWI), wie auch diejenigen des Ressourcenprojekts (ZG0, ZG02, ZG03). Für ZG01 konnten aufgrund von Datenlücken keine 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 9 dargestellt. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 eingeflossen bzw. der Messpunkt ZG-01 wurde ausgelassen.

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 $6 \mu\text{g m}^{-3}$, ist dieser Wert 2018 über alle Messgebiete mit etwa $8 \mu\text{g m}^{-3}$ deutlich höher.

In den Jahren 2019 und 2020 ist das frühere Pattern wieder erkennbar. Der Frühjahrspeak ist dabei an allen Standorten (ausser SZ) 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.

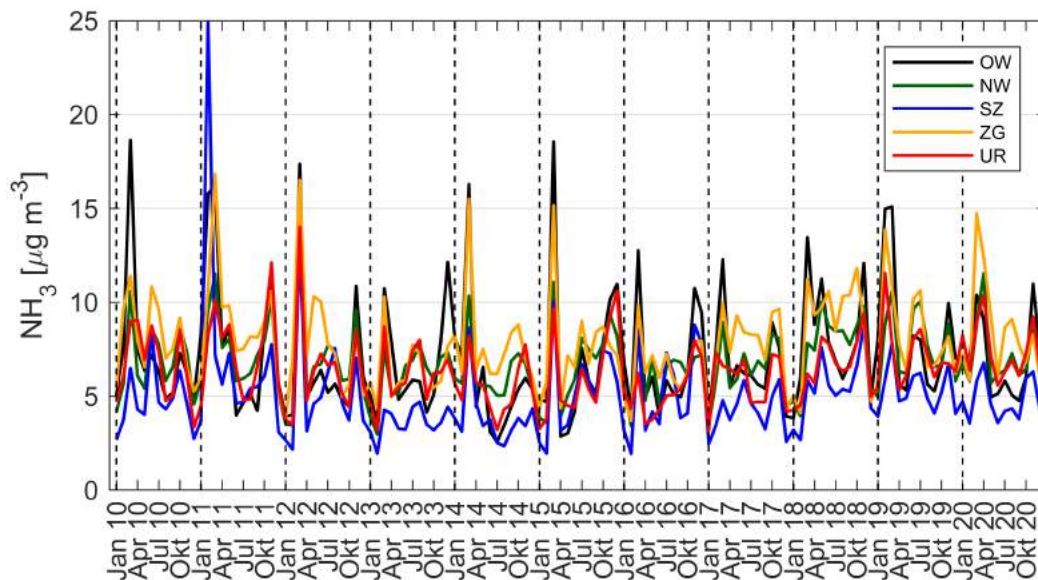


Abbildung 9: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne Luzern.

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration im Kanton Zug seit 2010 ist in Abbildung 10 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-Standorte der Zentralschweiz in Abbildung 9 vergleichbar. All diese Standorte liegen in Landwirtschaftsgebieten. Wie schon im Jahr 2019 beobachtet, ist der Frühlingspeak 2020 besonders 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 2020 einen Peak im Frühling, welcher in der Grössenordnung der Sommerpeaks der vorhergehenden Jahre liegt. Darauf gehen die Konzentrationen ohne einen auffälligen Sommer- oder Herbstpeak zurück.
- Tiefe Belastung: Die Messungen in Frübüel (FRÜE), Zigerhüttli (ZIGE) und Zugerberg (ZB01) wurden bewusst in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen und Gegenden mit geringer Belastung durchgeführt. Auch diese drei Standorte fallen 2020 durch einen deutlich sichtbaren Konzentrationsanstieg im Frühling anstatt Sommer auf.

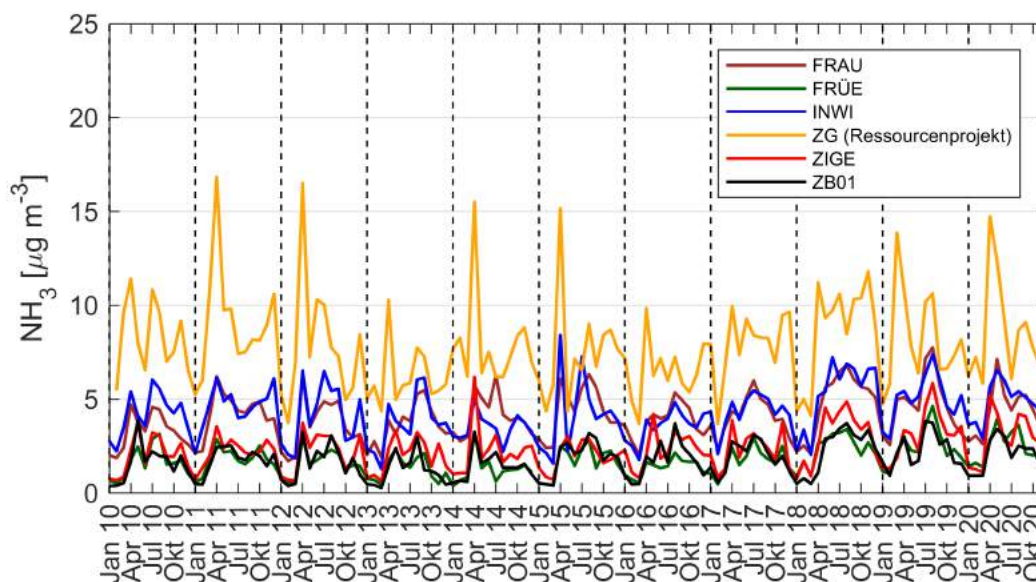


Abbildung 10: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den verschiedenen kantonalen Passivsammler-Standorten in Zug sowie den Zuger Ressourcenprojekt-Standorten (ZG).

Abbildung 11 zeigt schliesslich den Verlauf der Ammoniakkonzentrationen seit Januar 2010 für die Luzerner Messgebiete. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 eingeflossen bzw. die Messpunkte SCHÜ01 und HOL00/02/04 wurden ausgelassen.

Im Verlauf der Ammoniakkonzentration 2020 ist der Frühlingspeak gut zu erkennen. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Jahren ist der Sommerpeak jedoch schwächer oder gar nicht ausgeprägt. Der dritte Anstieg im Oktober ist bei Eschenbach, Neudorf und Root nicht sichtbar, in Wauwil und Schüpfheim jedoch sehr ausgeprägt.

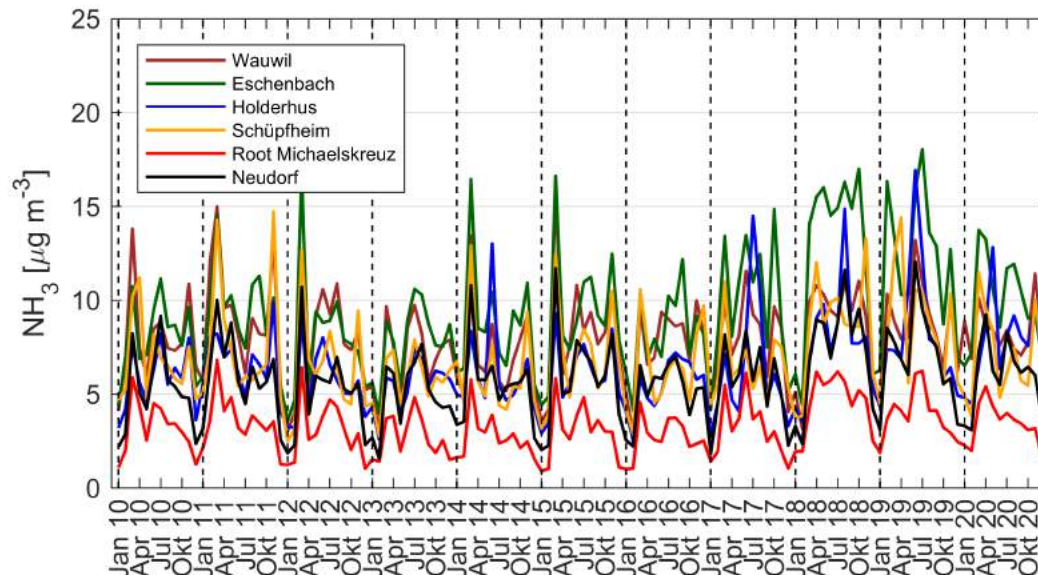


Abbildung 11: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010, gemittelt für jedes Messgebiet im Kanton Luzern.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen der Verläufe der Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2019 festgehalten werden:

- Die Ammoniakkonzentrationen 2020 sind im Vergleich mit den Vorjahren deutlich erhöht und vergleichbar mit den Jahren 2018 und 2019.
- Das Konzentrationsmuster aus früheren Jahren ist wieder erkennbar. Der Frühjahrespeak ist gut sichtbar. Danach sinken die Konzentrationen im Gegensatz zu 2017/2018 wieder, wobei der Sommerpeak jedoch schwach ausgeprägt ist. Der Peak im Herbst ist, je nach Messung, nicht sichtbar bis sehr ausgeprägt.
- Insbesondere Messpunkte in stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten zeigen mindestens einen Peak (April), 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 und 2020 dargestellt (Abbildung 12).

Im Messgebiet Zug sind die von Jahr zu Jahr variierenden Ammoniakbelastungen deutlich erkennbar (Abbildung 12). In allen gezeigten Jahren wurde ein ausgeprägter erster Peak der Ammoniakkonzentration im Monat März gemessen. Im Gegensatz zu 2018 und 2019 nahm die Konzentration im Jahre 2020 in den folgenden Wochen aber wieder ab, worauf sich im Juli und August ein weiterer leichter Peak zeigt. Ein deutlicher Herbstpeak ist im Messgebiet Zug nicht zu sehen. Die Konzentrationen nehmen aber mit Einbruch des Winters ab. Die monatlichen und jährlichen Unterschiede können qualitativ mit den meteorologischen Gegebenheiten erklärt werden.

Als Vergleich ist in Abbildung 12 die Ammoniakkonzentration auf Monatsbasis am Messpunkt Zugerberg dargestellt. Hier werden deutlich geringere Ammoniakkonzentrationen gemessen. Im Jahre 2020 war aber auch hier im März und April eine relativ hohe Belastung zu sehen, wobei diese aber während der Sommermonate deutlich geringer als 2018 und ausgeglichener als 2013 ist.

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.

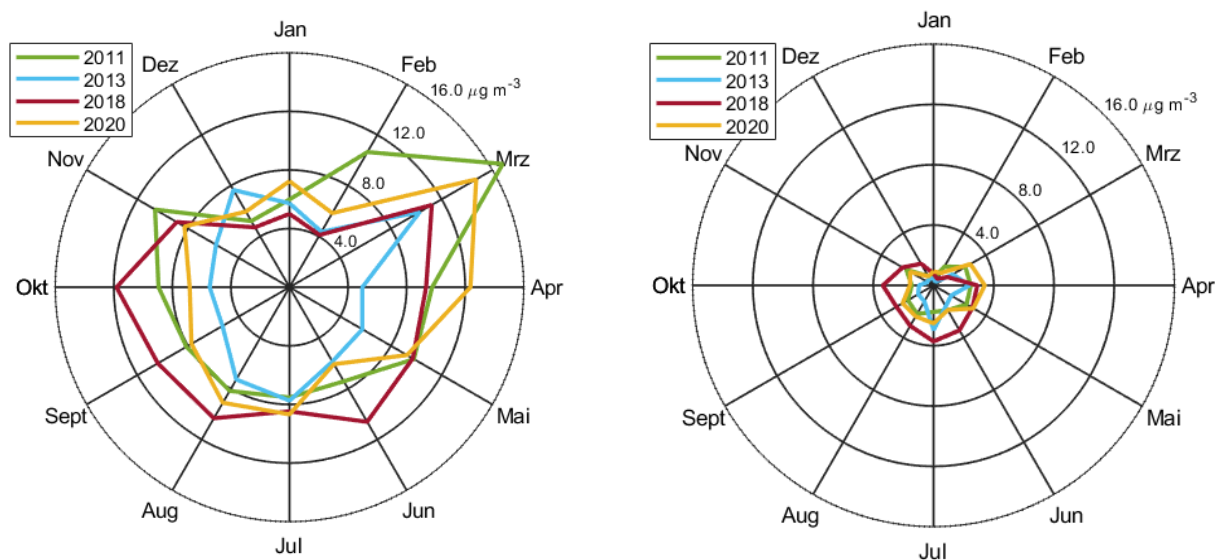


Abbildung 12: Darstellung der Monatsmittelwerte in Netzdiagrammen für das Messgebiet Zug (links) und den Messpunkt Zugerberg (rechts) für die Jahre 2011, 2013, 2018 und 2020.

3 Trendanalyse

3.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

Für die folgenden Abbildungen (Abbildung 13 bis Abbildung 17) wurden die Jahresmittelwerte der verschiedenen Messpunkte ab dem Jahr 2007 gemittelt. Dabei flossen nur Messstationen mit ein, welche repräsentativ für die Messgebiete sind und zudem zwischen 2007 und 2019 alle Messwerte aufweisen. Die verwendeten Stationen sind in der Bildlegende aufgeführt. Anschliessend wurden je zwei lineare Trends für das jeweilige Messgebiet berechnet, und zwar für die ganze Messperiode ("langfristig") und zusätzlich für die letzten fünf Jahre ("kurzfristig"). Die Trends sind als Änderung in $\mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr angegeben. Zusätzlich wird das 95%-Vertrauensintervall in eckigen Klammern aufgelistet.²⁹ 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, ist das Ammoniak-Jahresmittel 2020 in allen Messgebieten ausser Uri wieder leicht niedriger als in den zwei vorhergehenden Jahren.

- Das Messgebiet Wauwil zeigt über die mehrjährige Messperiode schwankende Ammoniakkonzentration mit einem positiven, nicht-signifikanten langfristigen Trend (Abbildung 13). Nach einem Rückgang zwischen 2011 und 2013 steigen die Werte seither wieder deutlich, was im kurzfristigen, aber nicht-signifikanten Trend zu sehen ist. Der Messwert 2020 ist leicht tiefer als 2018 und 2019.
- In den Messgebieten Neudorf (Abbildung 14) und Eschenbach (Abbildung 15) zeichnen sich ähnliche Konzentrationsverläufe ab, wobei der langfristige positive Trend hier jeweils signifikant ist. 2020 liegen die Messwerte jeweils leicht tiefer als 2018 und 2019.
- Das Messgebiet Nidwalden zeigt mit einem neutralen langfristigen Trend keine Abnahme der Ammoniakkonzentration (Abbildung 16). Auch hier liegt der Messwert 2020 leicht tiefer als 2018 und 2019.
- Die im Messgebiet Uri gemessene Ammoniakkonzentration ist, nach (statistisch signifikant) sinkenden Tendenzen bis 2016, seither deutlich steigend (Abbildung 17). Im Gegensatz zu den anderen Gebieten ist auch der kurzfristige Trend statistisch signifikant. Die im Jahr 2020 gemessene Konzentration ist nochmals etwas höher als in den zwei vorhergehenden Jahren und damit auf ähnlichem Niveau wie 2011.

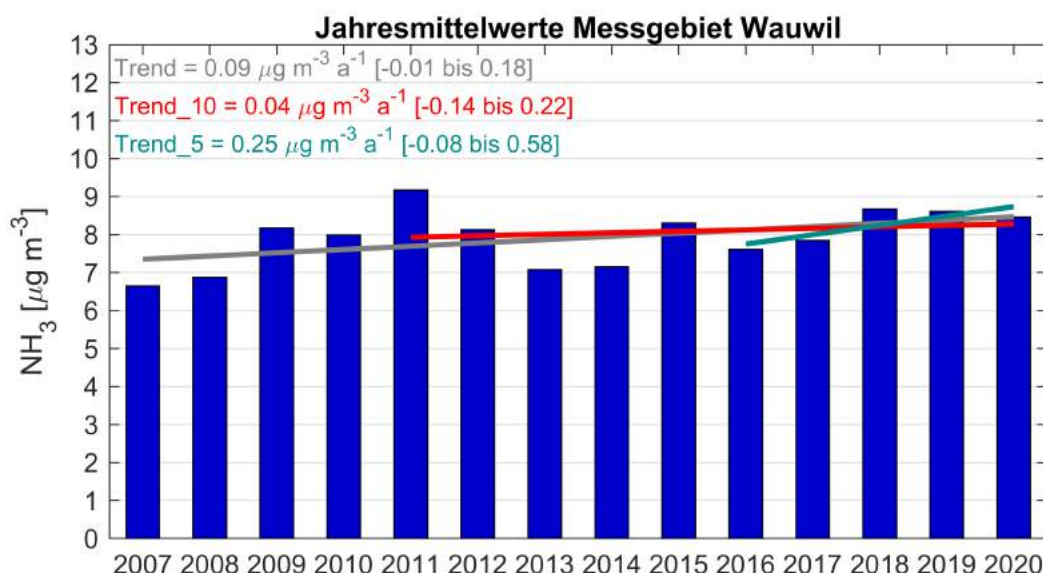


Abbildung 13: Trendberechnungen für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Wauwil (verwendete Stationen zur Trendberechnung: WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19). Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

²⁹Ein 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.

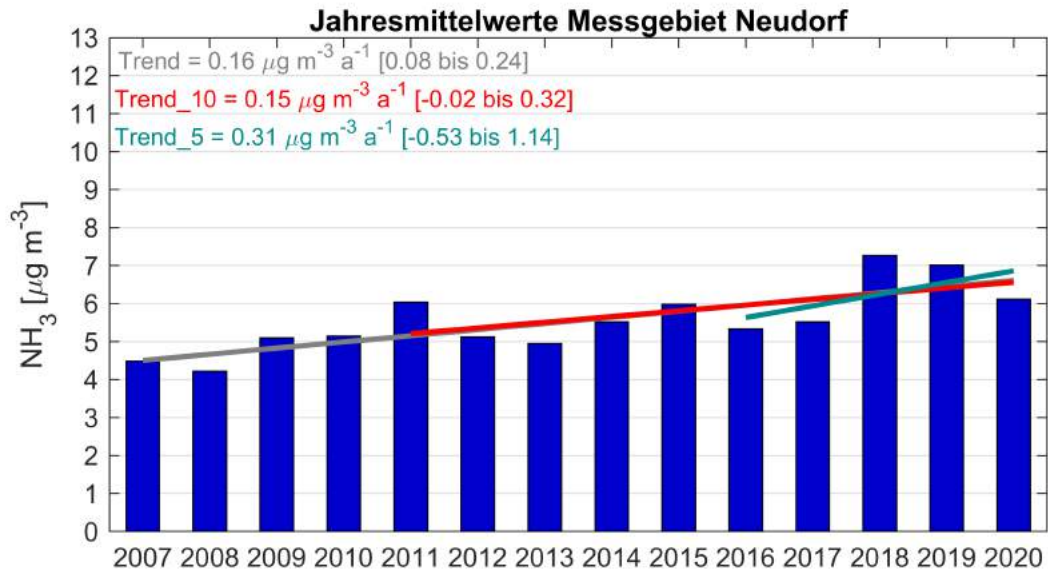


Abbildung 14: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Neudorf (verwendete Stationen zur Trendberechnung: NEU01, NEU02, NEU03). Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

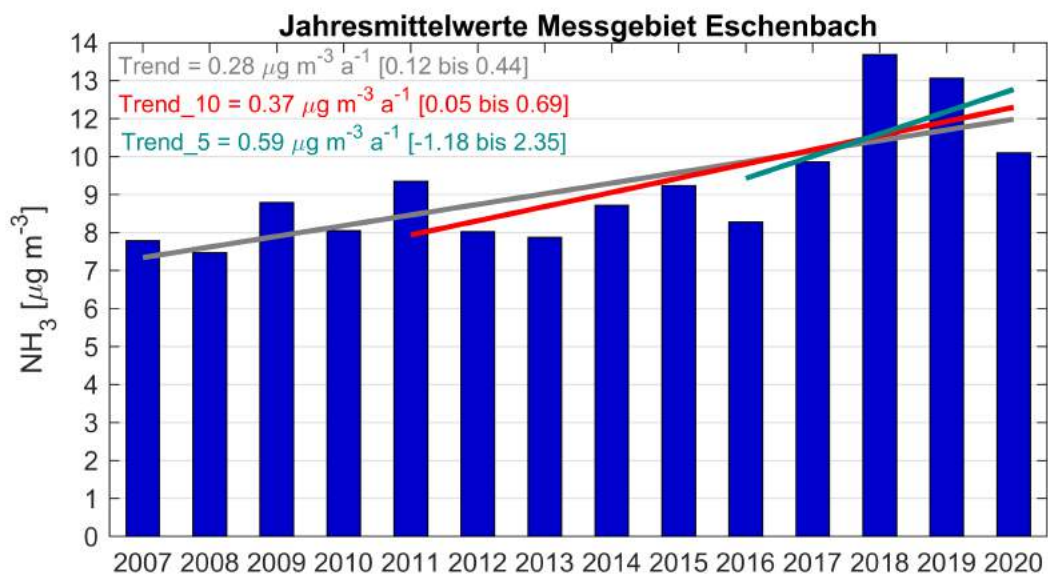


Abbildung 15: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Eschenbach (verwendete Stationen zur Trendberechnung: ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19). Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre. Zum besseren Verständnis wurde die y-Achsen-Skala in dieser Abbildung den Messwerten angepasst.

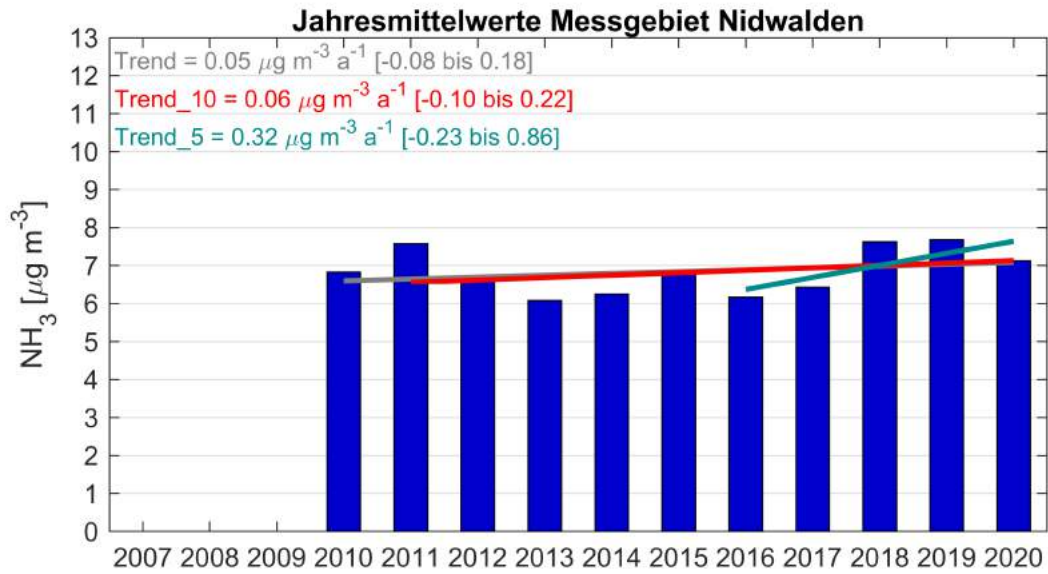


Abbildung 16: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Nidwalden (verwendete Stationen zur Trendberechnung: NW01, NW02, NW03). Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

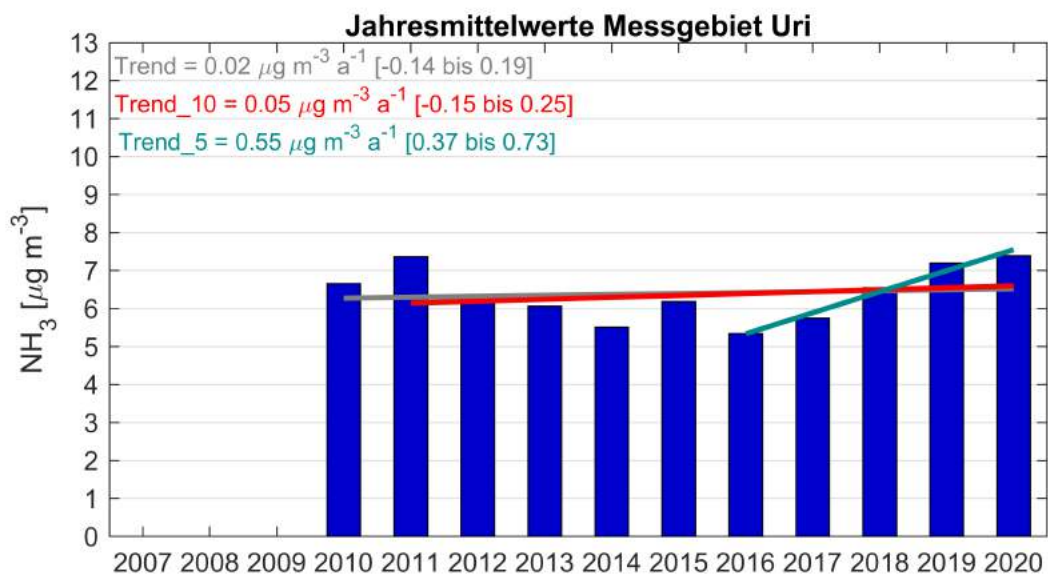


Abbildung 17: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Uri (verwendete Stationen zur Trendberechnung: UR01, UR02, UR03). Der rote Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

3.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkten

In diesem Unterkapitel werden die Jahresmitteltrendberechnungen an vier ausgewählten Messpunkten aufgezeigt. Bei den 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

Bei der Berechnung wurde jeweils ein Trend über die gesamte Messperiode berechnet («Trend», graue Linie). Zusätzlich ist ein zehnjähriger («Trend 10», rote Linie) und ein fünfjähriger Trend («Trend 5», türkise Linie) angegeben. Abbildung 18 bis Abbildung 21 zeigen diese Trendberechnungen für die vier ausgewählten Messpunkte. Die Trendberechnung für alle Messpunkte ist im Anhang zu finden.

Generell ist festzustellen, dass an vielen Messpunkten eine leicht tiefere Konzentration wie in den beiden Vorjahren gemessen wurde.

- SCHU00: Seit Messbeginn (2000) statistisch signifikante, zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.12 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Nach einem leichten Rückgang zwischen 2015 und 2017 hat der Messwert in den Jahren 2018 und 2019 sprunghaft zugenommen, liegt 2020 aber wieder im vorherigen Bereich.
- ESC14: Seit Messbeginn (2006) statistisch signifikante, zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.45 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Der neue Wert ist, nach sehr hohen Messwerten in den zwei vorhergehenden Jahren, wieder auf ähnlichem Niveau wie 2017.
- UR02: Der langjährige Trend seit 2010 zeigt eine abnehmende Ammoniakkonzentration ($-0.07 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Dieser ist aber nicht signifikant, da seit 2016 stetig steigende Konzentrationen verzeichnet werden. Deshalb ist der fünfjährige Trend signifikant zunehmend ($+0.59 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Auch 2020 war der Messwert wiederum leicht höher als im Vorjahr.
- ZB01: Neu ist der zehnjährige Trend signifikant positiv ($+0.08 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Die Konzentrationen sind jedoch auf einem tieferen Niveau als bei den vorherig gezeigten Messpunkten.

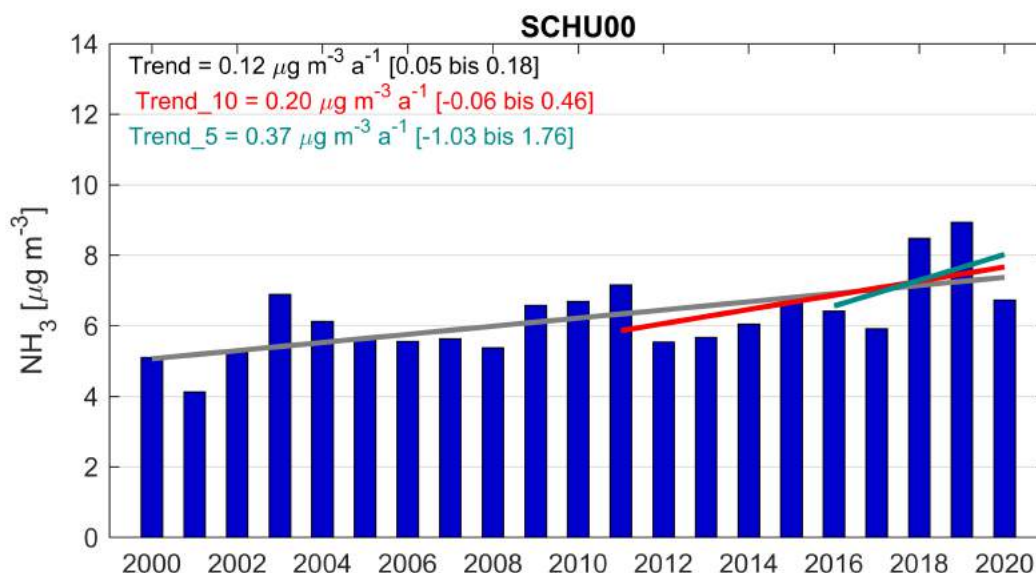


Abbildung 18: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt SCHU00. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre.

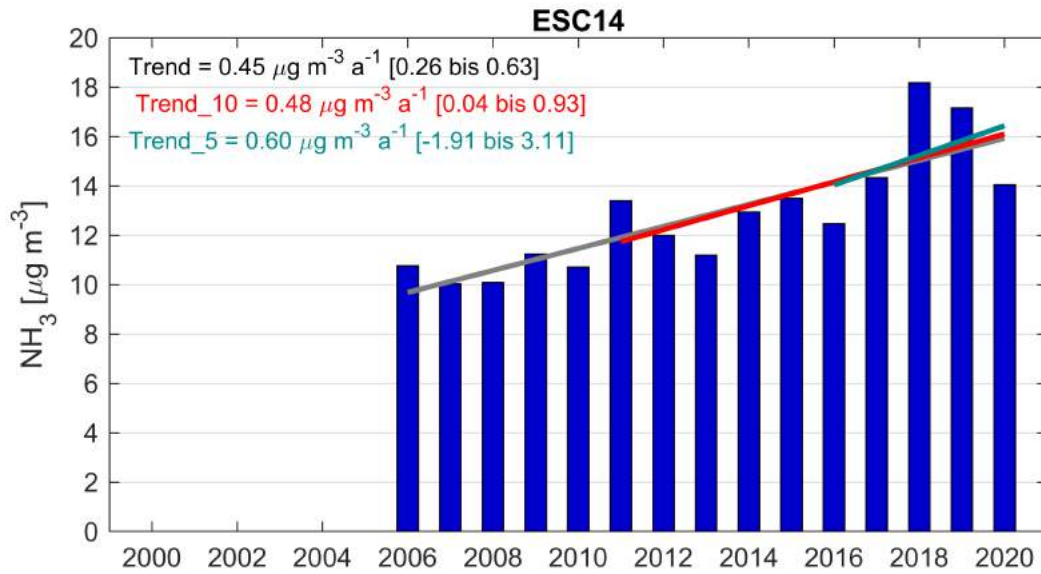


Abbildung 19: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ESC14. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre. Zum besseren Verständnis wurde die y-Achsen-Skala in dieser Abbildung den Messwerten angepasst.

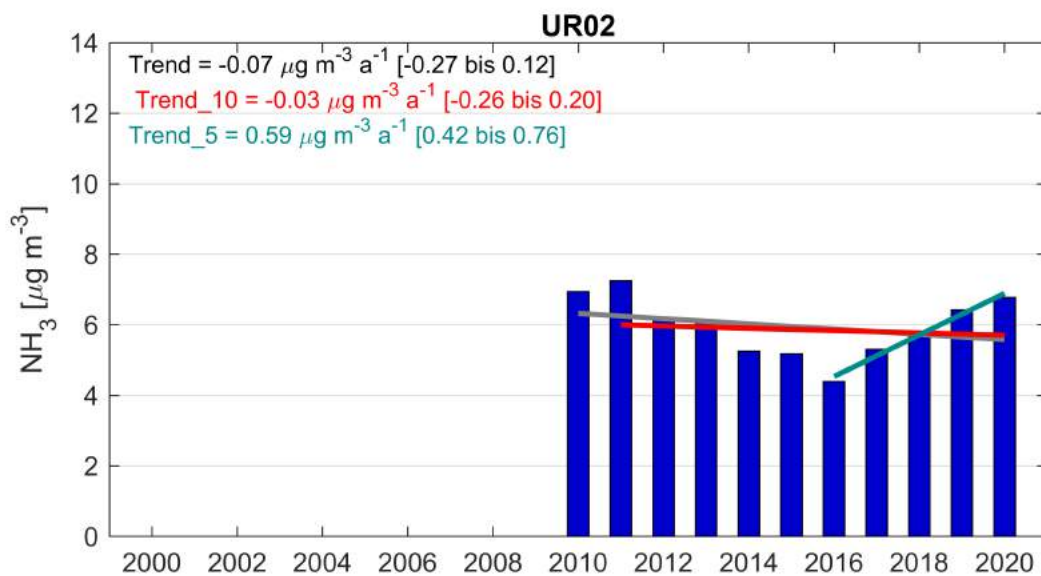


Abbildung 20: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt UR02. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre.

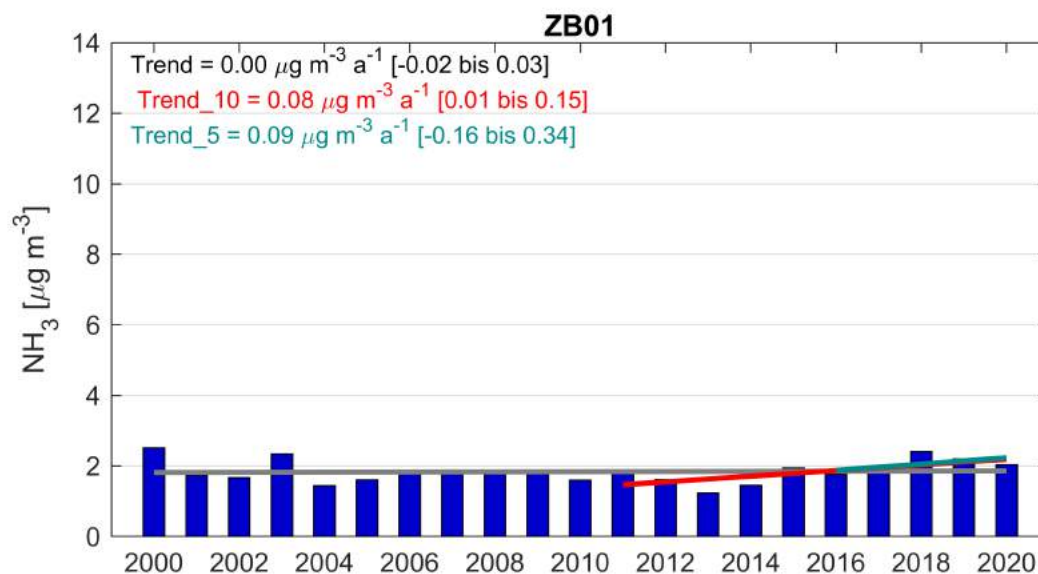


Abbildung 21: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ZB01. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010 und in Türkis derjenige der letzten fünf Jahre.

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 Loads³⁰ 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_{NH_3} , die Expositionsdauer d_{exp} und die Depositionsgeschwindigkeit V_{dep} abgeschätzt werden:

$$F \text{ [kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}] = V_{dep,i} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] * d_{exp} \left[\frac{\text{S}}{\text{a}} \right] * c_i \left[\frac{\mu\text{g NH}_3}{\text{m}^3} \right] * N_i \left[\frac{\{\text{N}\}}{\{\text{NH}_3\}} \right] * 10^4 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right] * 10^{-9} \left[\frac{\text{kg}}{\mu\text{g}} \right] * 10^{-9} \left[\frac{\text{m}}{\text{mm}} \right]$$

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.³¹ 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.

³⁰UNECE (2007). Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts. ECE/EB.Air/WG.5/2007/3

³¹EKL (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 1.1) 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 1.1). 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 beinhaltet 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.³²

Abbildung 22 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. Seit 2016 steigen die Ammoniakdepositionen wieder. Im Jahre 2018 liegen alle berechneten Depositionen über dem Referenzjahr 2010, mit Ausnahme von «Uri». «ESC08» und «ZB01» erreichen Rekordwerte von über 150 %, welche diesmal nicht als Ausreisser von einzelnen Messpunkten betrachtet werden können. 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.

Tabelle 2: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak in kg N ha⁻¹ a⁻¹ an fünf verschiedenen Messpunkten sowie den ZUDK-Messgebieten des Ressourcenprogramms.³³ Die gezeigten Werte können durch ein neues Exportverfahren im Datenmanagement leicht von früheren Werten abweichen.

	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

³²Seitler, E., Thöni, L., Meier, M. (2016). Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB.

³³In die Berechnung für OW fliessen hier nur OW01 und OW02 ein. Der Standort OW03 wurde aufgehoben und stattdessen OW04 in Betrieb genommen. Die Berechnung wurde auch auf die vorherigen Jahre angepasst. In die Berechnung für ZG fliessen aufgrund von Vandalismus ab Ende 2013 am Standort ZG01 nur die Daten von ZG02 und ZG03 in die Berechnung ein. Die Berechnung wurde auch auf die vorherigen Jahre angepasst.

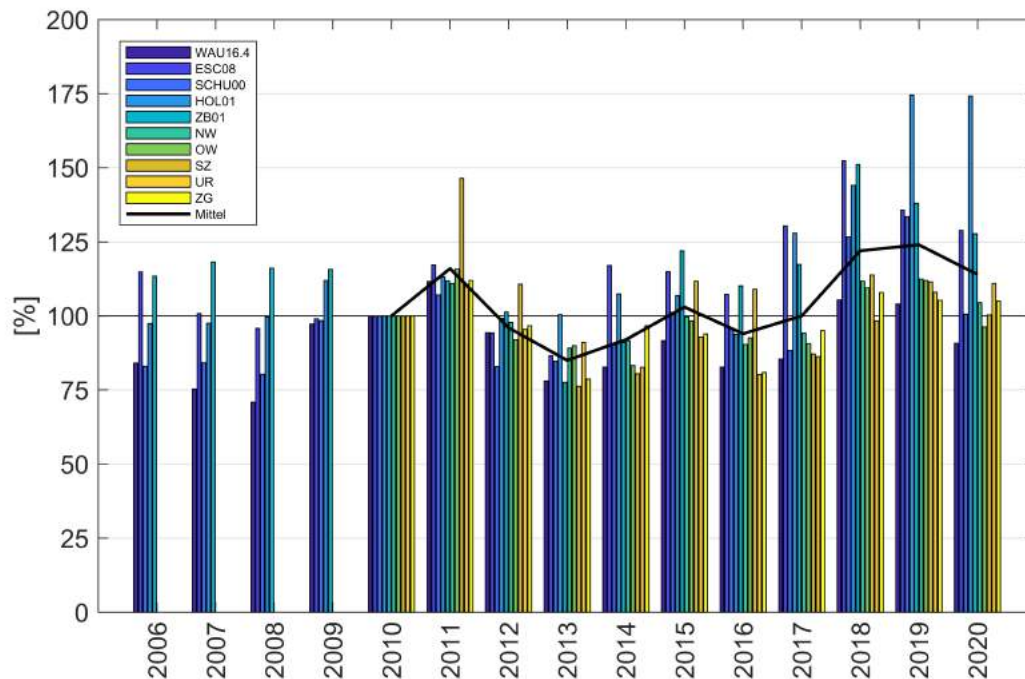


Abbildung 22: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak an fünf Messpunkten und in den fünf Ressourcenprojekt-Messgebieten Zentralschweiz in Bezug auf das Jahr 2010 (2010 = 100 %) sowie das Mittel der ausgewählten Messpunkte und -gebiete seit 2010 (schwarze Linie).

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 Stickstoffsinken 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 23 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 23) 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 23) 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 24 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 23 beobachteten nach oben gerichtete Knick zu sehen. Daher steigen die mittleren Depositionszahlen teilweise zum wiederholten Mal.

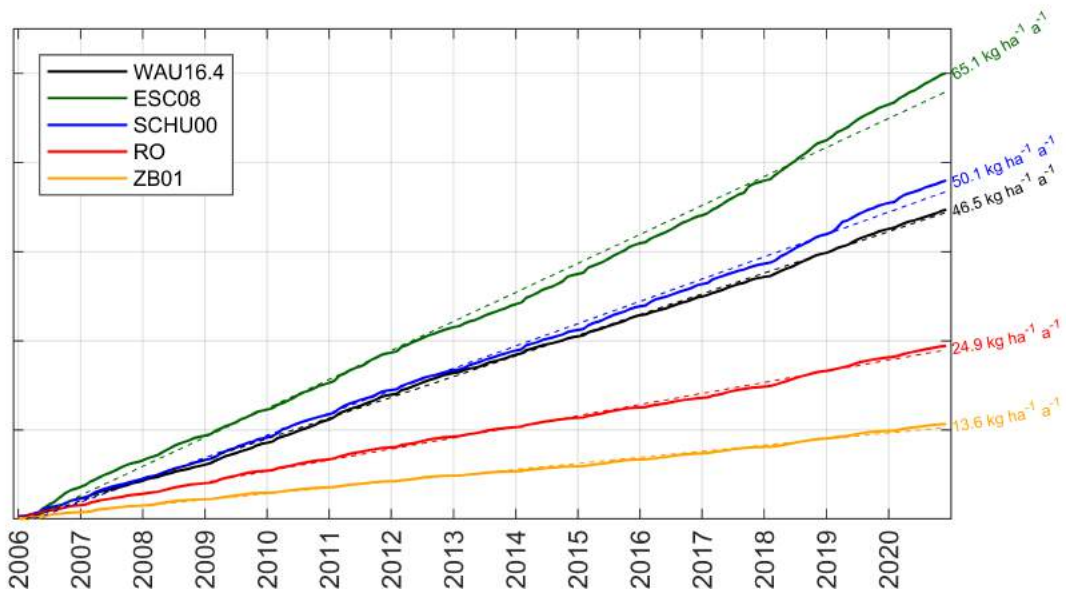


Abbildung 23: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Depositionen seit Januar 2006 bis Dezember 2018 an fünf verschiedenen Messpunkten in der Zentralschweiz. Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion, die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittlere N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr, berechnet aus der linearen Regressionsfunktion.

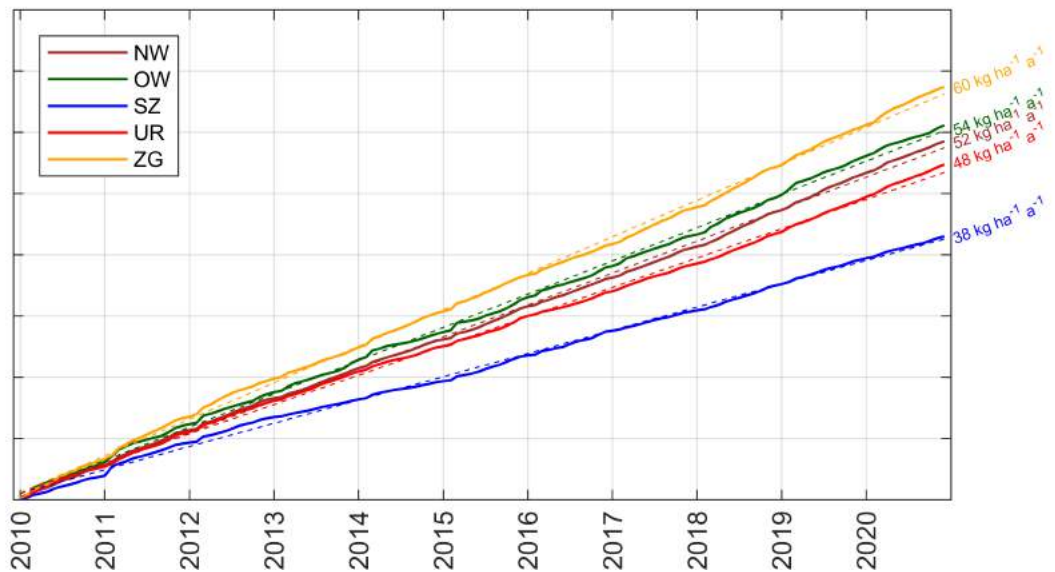


Abbildung 24: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Deposition aller Ressourcenprojekt-Standorte der ZUDK (Ressourcenprojekt-Messpunkte seit 2010). Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion. Die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittleren N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr, berechnet aus der linearen Regressionsfunktion.

3.4 Einfluss der Meteorologie auf NH₃-Trends

Die jährliche Variabilität der gemessenen Ammoniakkonzentrationen ist unter anderem auf die Schwankungen der Witterung zurückzuführen. Philipp & Locher (2010)³⁴ 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 NH₃-Immission: "Die NH₃-Immissionen steigen [...] mit steigender Lufttemperatur und Erhöhung der mittleren Anzahl Trockentage und sinken mit zunehmendem Wind".

So spielten die Witterungsverhältnisse 2018 bis 2020 wohl eine wichtige Rolle: Alle drei Jahre 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.^{35 36 37}

Diese meteorologischen Umstände machen sich in den Messungen der drei letzten Jahre bemerkbar, die allgemein sehr hoch ausfallen. Die sommerliche Hitze zusammen mit trockenen Phasen hat dazu beigetragen, dass erstens mehr Ammoniak in die Luft entwich und zweitens dort verweilen konnte.

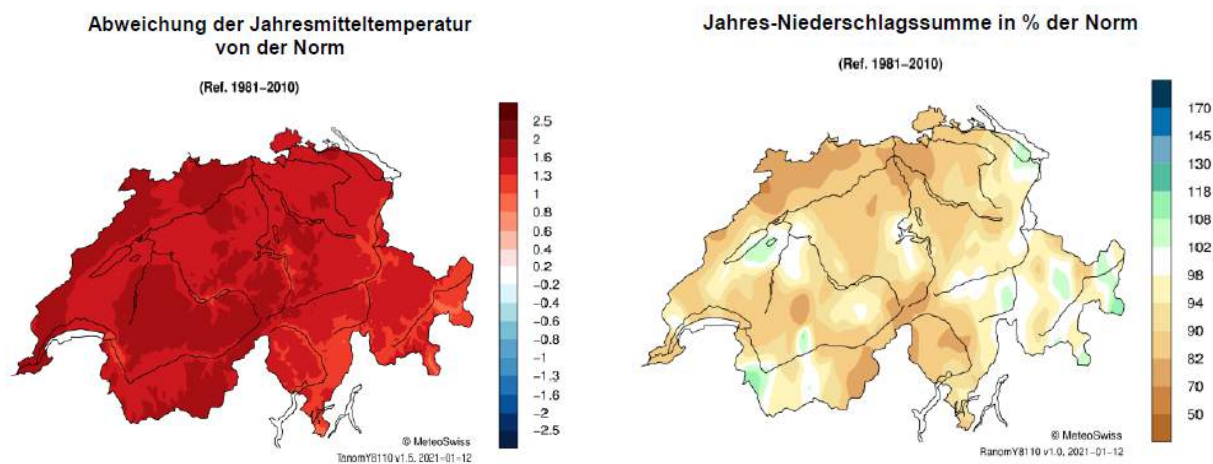


Abbildung 25: Links: Abweichung der Jahresmitteltemperatur 2020 von der Norm (1981-2010) in °C . Rechts: Jahres-Niederschlagssumme in Prozent der Norm (1981-2010). Quelle: MeteoSchweiz (2021). Klimabulletin 2020.

³⁴Philipp, M., & Locher, R. (2010). Trendanalyse NH₃-Immissionsmessungen in der Schweiz (S. 38). Winterthur: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.

³⁵MeteoSchweiz (2019). Klimabulletin Jahr 2018.

³⁶MeteoSchweiz (2020). Klimabulletin Jahr 2019.

³⁷MeteoSchweiz (2021). Klimabulletin Jahr 2020.

3.5 Einfluss der Tierzahlen auf NH₃-Trends

Die Entwicklung der Tierzahlen im Umkreis von 2 km um jeden Luzerner Messpunkt wurde vom uwe Luzern ermittelt.³⁸ Die Zahlen zeigen, dass die Grossvieheinheiten (GVE) während der letzten Jahre entweder stabil waren oder zugenommen haben (Wauwil als Beispiel in Abbildung 26). Die weiteren Abbildungen sind im Anhang angefügt.

Einerseits bedeutet diese Beobachtung, dass die Massnahmen des Kantons^{39 40} zur Ammoniakreduktion nicht generell zu einer Reduktion der hiesigen Tierbestände geführt hat. Andererseits heisst es auch, dass weiterhin gleich viele oder mehr Nährstoffe auf Hofebene anfallen und ausgebracht werden müssen, was dem Reduktionsziel Ammoniak nicht zuträgt.

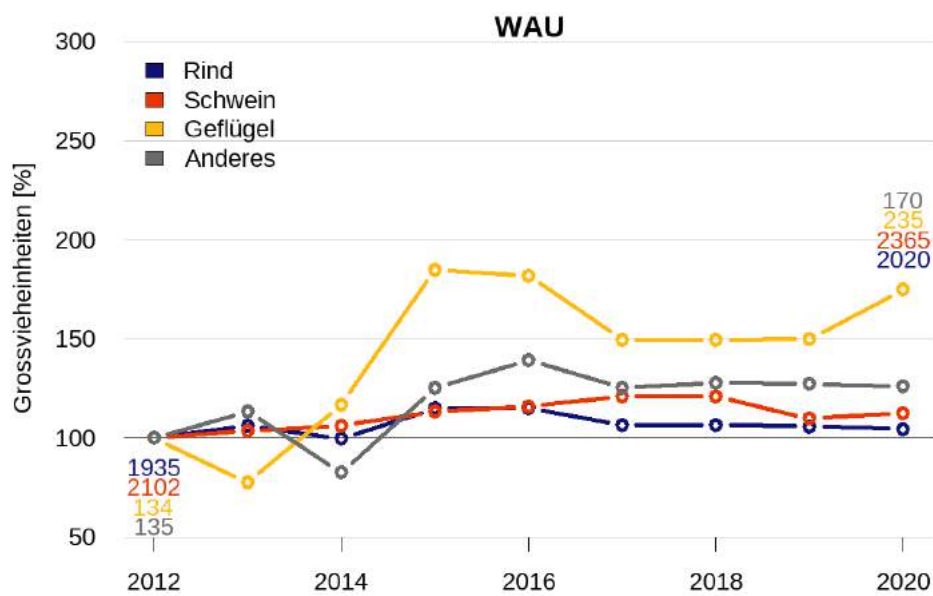


Abbildung 26: Die für Wauwil evaluierte Entwicklung der Tierzahlen in GVE zwischen 2012 und 2020.

³⁸Auszug aus der LAWIS-Datenbank, persönliche Kommunikation mit Peter Bucher, August 2020

³⁹uwe Luzern (2020). Teilplan Ammoniak in der Landwirtschaft. Schlussbericht Massnahmenplan II 2020.

⁴⁰Amt für Umweltschutz Zug (2016). Massnahmenplan Ammoniak 2016 -2030 Kanton Zug.

4 Diskussion

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz 2020 fallen, wie schon 2018 und 2019, allgemein durch hohe Werte auf, welche aber an vielen Messstellen leicht tiefer sind als in den zwei vorhergehenden Jahren. Ein erster hoher Peak ist an den meisten Messpunkten im März 2020 zu sehen, was mit dem Ausbringen von Gülle und einer aussergewöhnlich trockenen und warmen Frühlingsphase zusammenfällt. Im Gegensatz zu den zwei vorhergehenden Jahren sinken die Konzentrationen im Frühsommer jedoch leicht. An manchen Messpunkten ist ein Sommerpeak erkennbar. Die Herbstpeaks sind gar nicht bis nur schwach ausgeprägt.

Langjährige negative Trends werden durch die Ergebnisse der letzten drei Jahre stark abgeschwächt und positive verstärkt. Die in den entsprechenden Gebieten getroffenen Massnahmen für eine verbesserte Luftreinhaltung zeigen somit zu wenig Wirkung, um die Ammoniakimmissionen ganzjährig zu senken. Zu gleichen Ergebnissen bezüglich hohen Messresultaten und Trendberechnungen kommt auch der schweizweite Bericht zu Ammoniak-Immissionsmessungen: «An vielen Standorten gehörten die Jahresmittelwerte 2020 nach 2018 und 2019 zu den höchsten seit Messbeginn im Jahr 2000».⁴¹ Ein Grund dafür ist unter anderem die spezielle Witterung mit hohen Temperaturen und trockenen Perioden. Durch diese meteorologischen Verhältnisse entwich viel Stickstoff in Form von Ammoniak aus der Gülle und verweilte anschliessend in der Atmosphäre.

Deshalb wird generell empfohlen, Gülle bei kühlen und feuchten Bedingungen auszutragen.^{42 43 44} Diese Massnahme wird aber zum Beispiel im «Massnahmenplan Ammoniak» vom Kanton Zug nicht gesondert aufgeführt, weil sie nicht geprüft werden kann.⁴⁵ Gemäss der Datenlage muss davon ausgegangen werden, dass Landwirte 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.⁴⁶^{47 48} Dieser Zusammenhang sollte besser untersucht werden, um den Landwirten faktenbasierte Empfehlungen geben zu können.

Ein weiterer Faktor für stabile bis steigende Ammoniakimmissionen ist die Tierzahl im Messperimeter. Zahlen aus dem Kanton Luzern zeigen, dass die Grossvieheinheiten stabil bis steigend sind. Dieser Umstand hilft nicht, die gesetzten NH₃-Minderungsziele zu erreichen.

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.

⁴¹Seitler, E. & Meier, M. (2021). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2020. FUB.

⁴²Agridea (2011). Ammoniakverluste aus der Landwirtschaft. Merkblatt.

⁴³Richner W. & Sinaj S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.

⁴⁴Wey, 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.

⁴⁵Amt 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>

⁴⁶Hersener, J.-L., Meier, U., & Dinkel, F. (2002). Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung. Amt für Umweltschutz Kanton Luzern. Tabelle 19, S.22 nach Döhler 2001.

⁴⁷Cormann, 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).

⁴⁸Häni, 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.



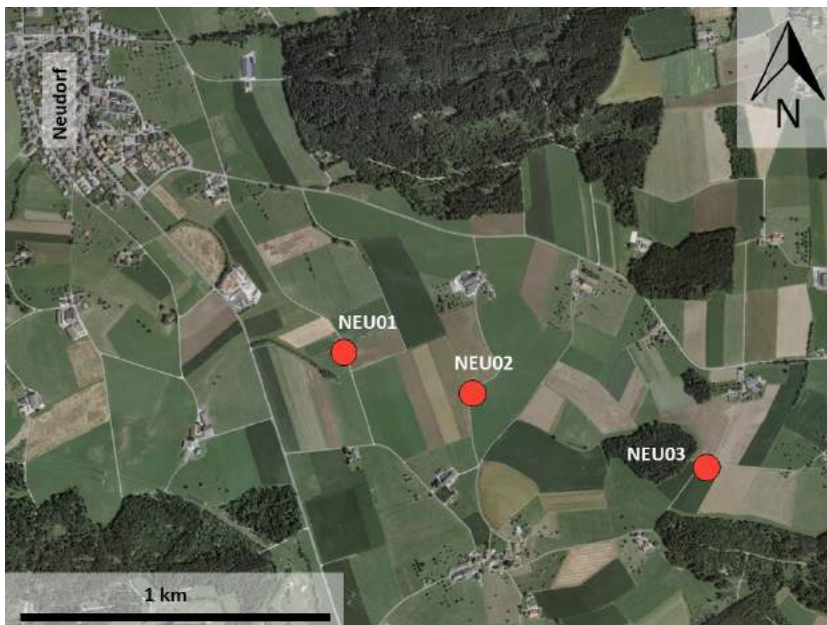
5.1.2 Eschenbach, Luzern

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.



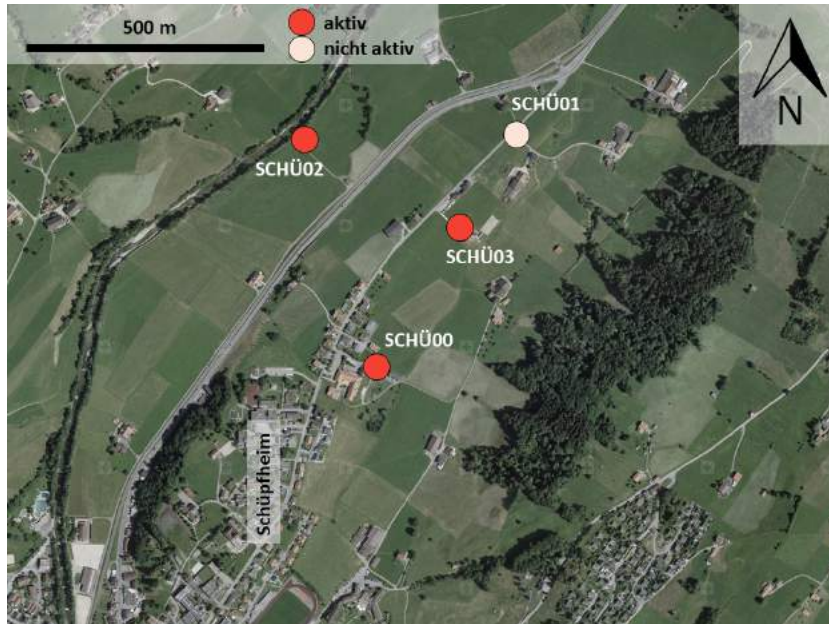
5.1.3 Neudorf, Luzern

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.



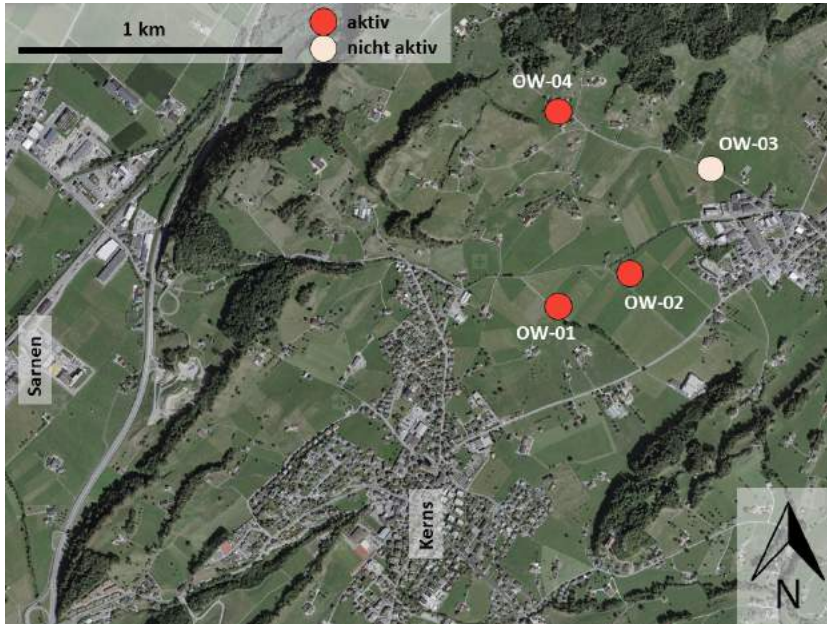
5.1.7 Nidwalden

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.



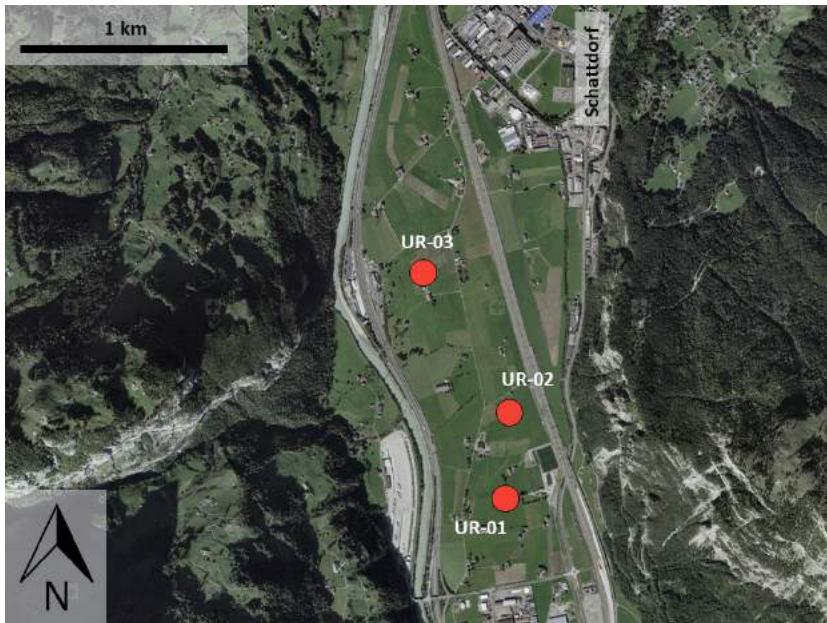
5.1.8 Obwalden

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.



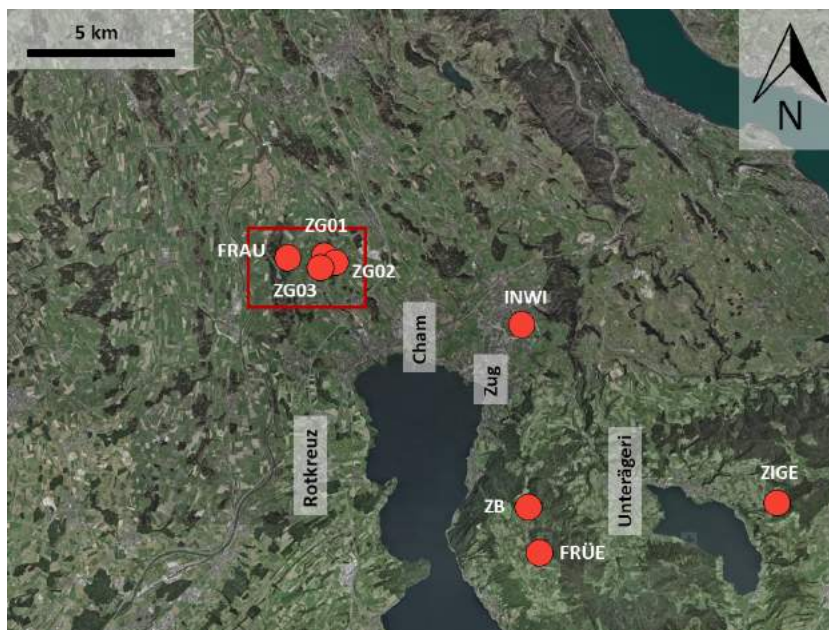
Zusätzlich wurde im Kanton Schwyz von 2014-2017 und wiederum ab Frühjahr 2019 in Wangen die Ammoniakkonzentration gemessen. Der Messpunkt (WAN01) liegt in der Linthebene zwischen Wangen und Lachen und wurde aufgrund der Flechtenkartierung 2013 bzw. aufgrund der Messperiode 2014-2017 so gewählt. Ebenfalls 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, Fruebüel und Frauental). Zusätzlich wurde ein typischer Agglomerations-Hintergrundstandort gewählt, um den Einfluss von Strassen und der Stadtnähe zu bestimmen (Messgebiet Inwil).

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



Neben fünf kantonalen Messstationen hat der Kanton Zug im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz zusätzlich drei Messpunkte installiert. 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 Krette der Mülimannsegg, 600 m über dem Vierwaldstättersee auf gut 1'000 m ü. M.



5.2 Charakterisierung der Messpunkte

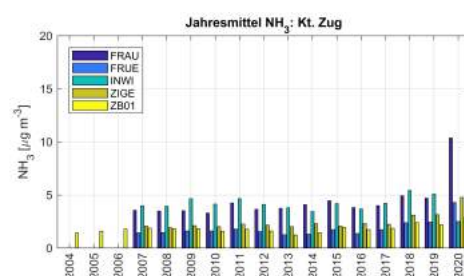
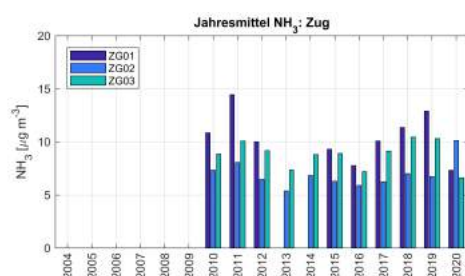
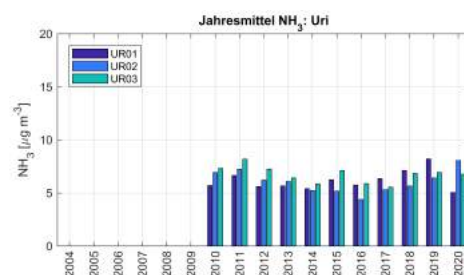
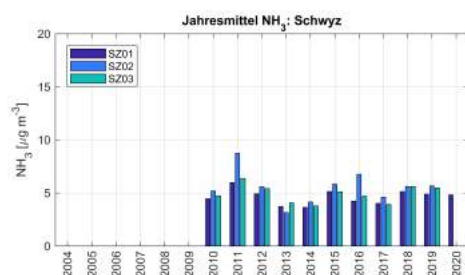
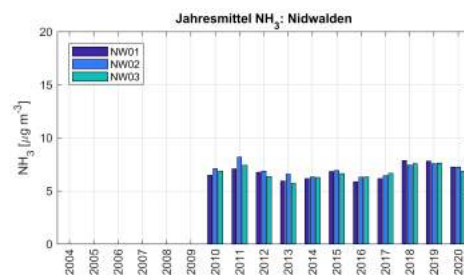
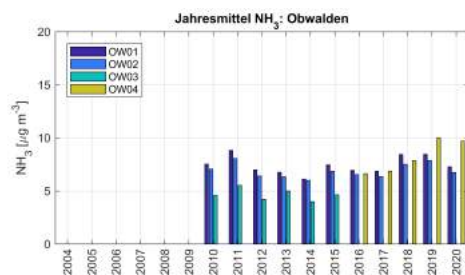
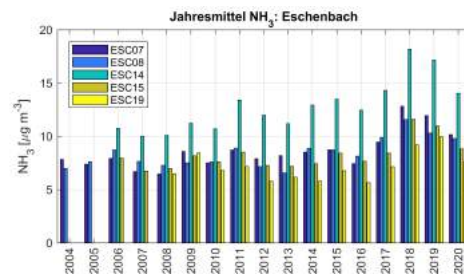
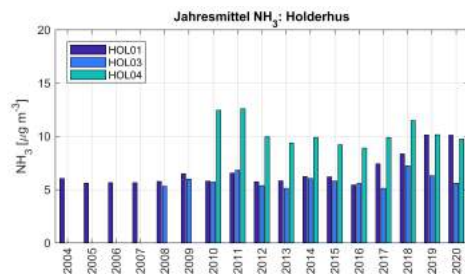
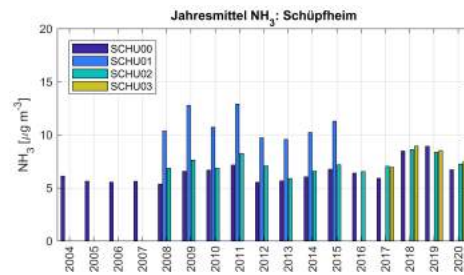
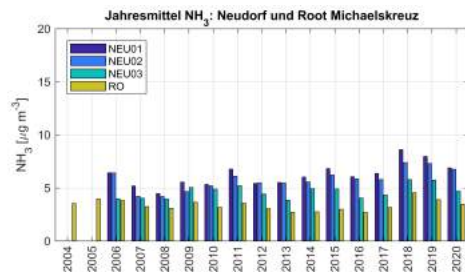
Tabelle 3: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte, Teil 1. Die angegebenen Jahreswerte sind Jahresmittel in $\mu\text{g m}^{-3}$.

Standort		Messnetz	E-Koord.	N-Koord.	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
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
WAU13	Wauwil 13	Luzern	2 644 669	1 224 165	10.9	10.3	9.2	9.0	10.0	9.5	9.8	10.9	11.1	12.3
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
SCHÜ03	Schüpfheim 3	Luzern	2 644 883	1 201 384	-	-	-	-	-	-	7.0	8.9	8.5	7.5
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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	
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
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
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
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
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

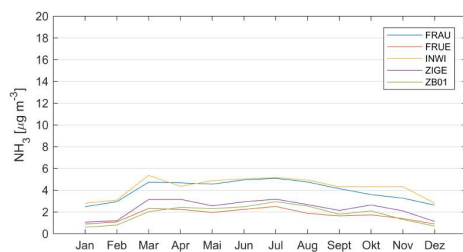
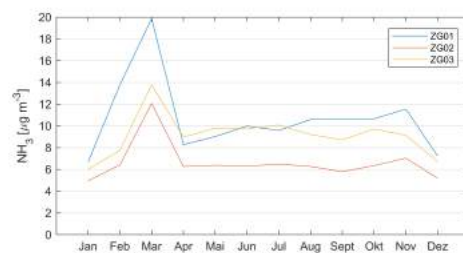
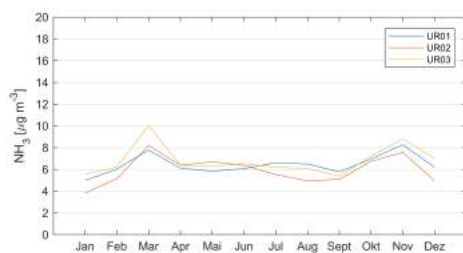
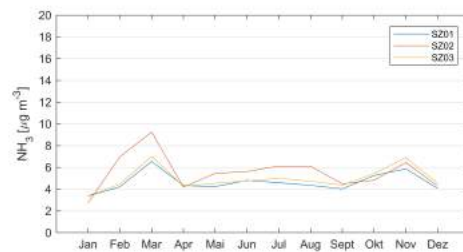
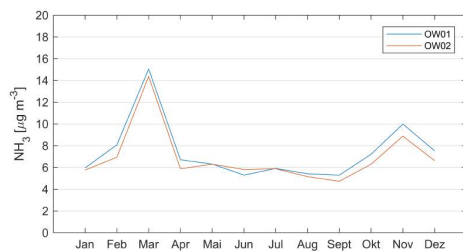
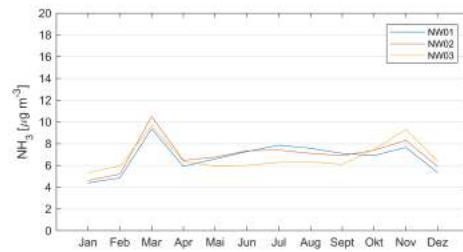
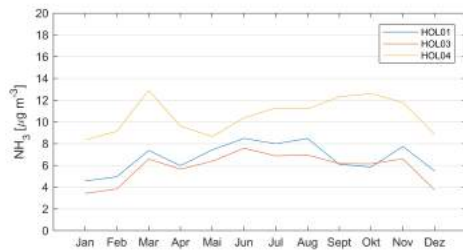
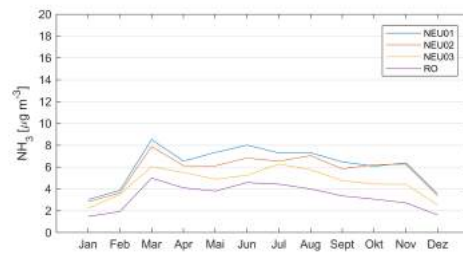
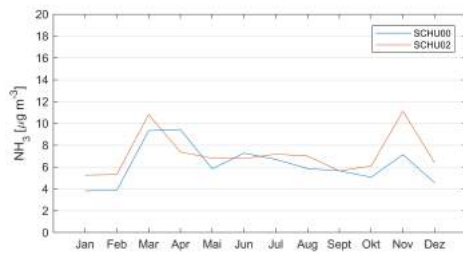
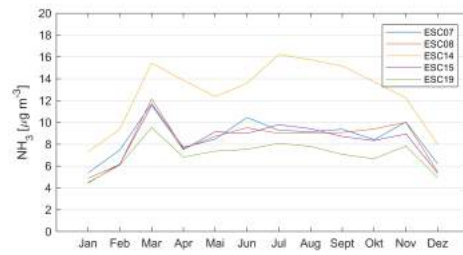
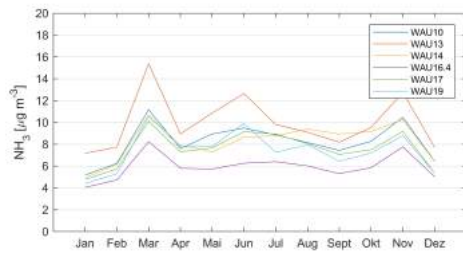
Tabelle 4: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte, Teil 2. Die angegebenen Jahreswerte sind Jahresmittel in $\mu\text{g m}^{-3}$.

Standort		Messnetz	E-Koord.	N-Koord.	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
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
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
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
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
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
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
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
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
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
FRUE	Frübüel	Kt. Zug	2 683 423	1 218 884	1.8	1.6	1.3	1.3	1.7	1.4	1.7	2.4	2.5	2.5
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
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
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
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
WAN01	Wangen 01	Kt. Schwyz	2 709 749	1 227 700	-	-	-	-	-	8.2	7.6	-	9.3	9.2
SCHUB01	Schübelbach	Kt. Schwyz	2 712 631	1 226 837	-	-	-	-	-	-	-	-	14.1	14.3
TUG01	Tuggen	Kt. Schwyz	2 714 630	1 228 761	-	-	-	-	-	-	-	-	7.8	7.6

5.3 Mittlerer Jahresgang der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten



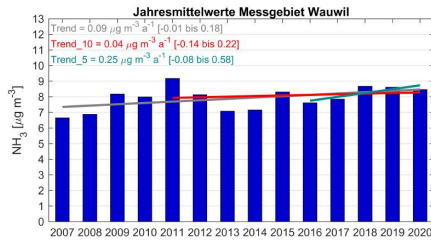
5.4 Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2010 - 2020)



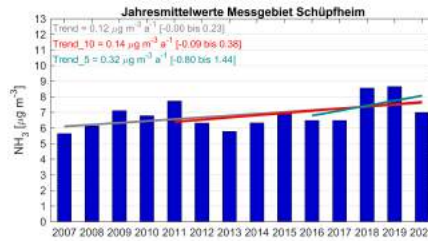
5.5 Trendberechnungen

5.5.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

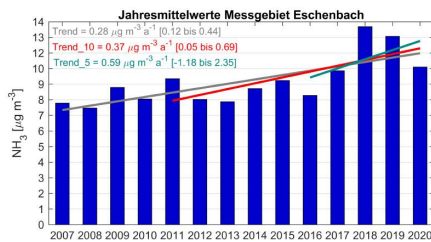
Unter den Grafiken sind jeweils die verwendeten Stationen für die Berechnung des Mittelwerts und der Trendwerte angegeben.



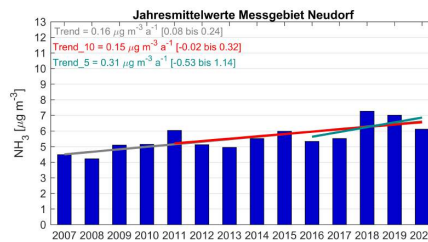
WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19



SCHU00, SCHU02



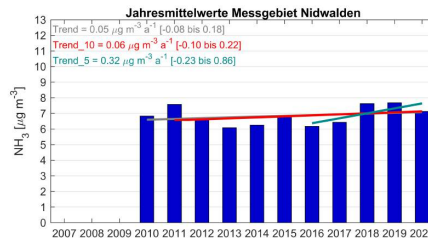
ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19



NEU01, NEU02, NEU03



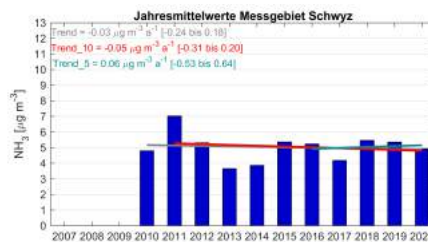
HOL01, HOL03



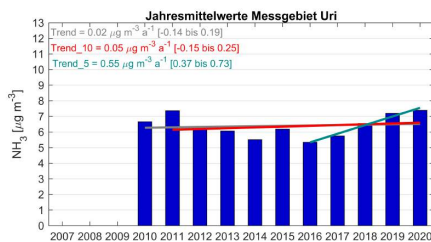
NW01, NW02, NW03



OW01, OW02



SZ01, SZ02, SZ03, SZ03a

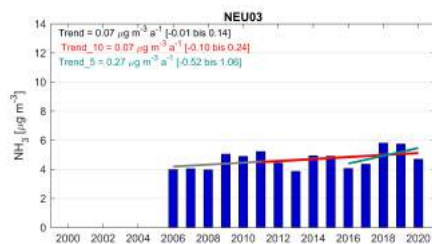
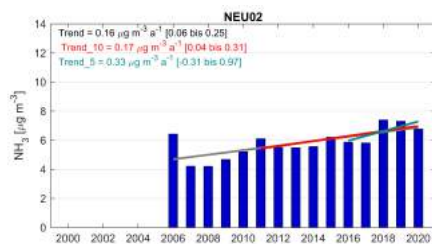
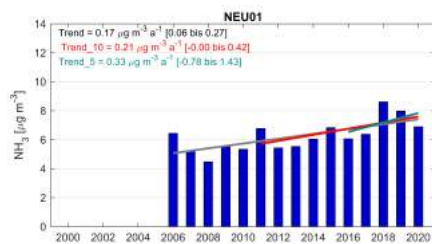
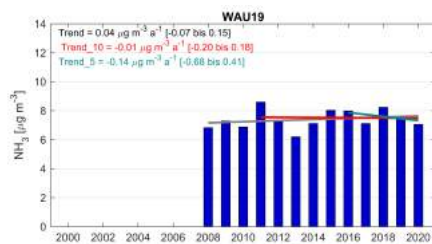
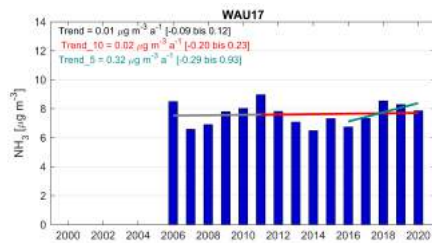
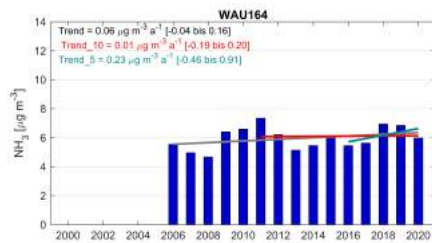
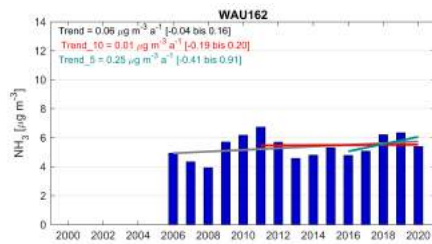
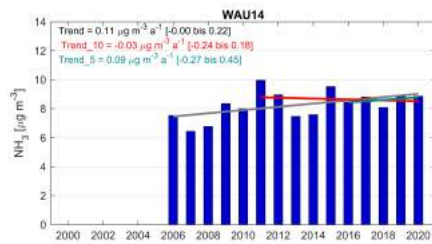
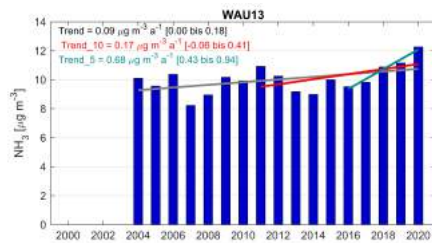
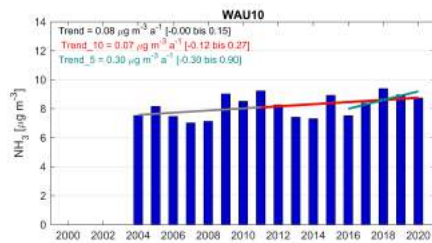


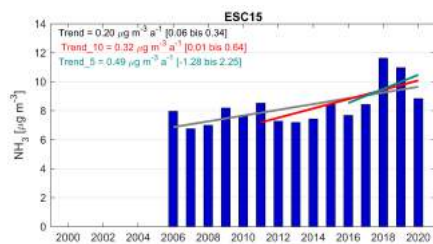
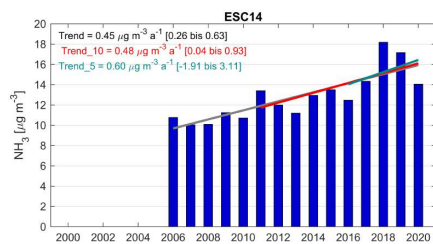
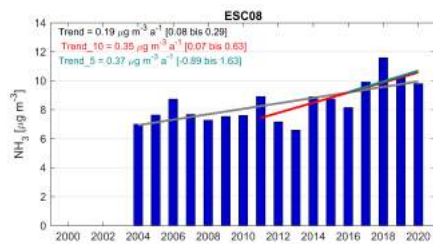
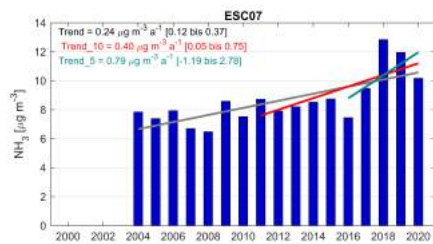
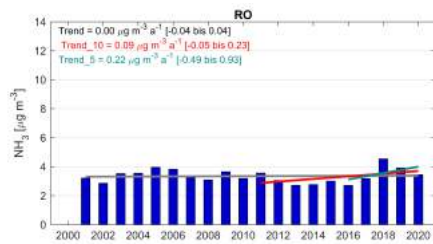
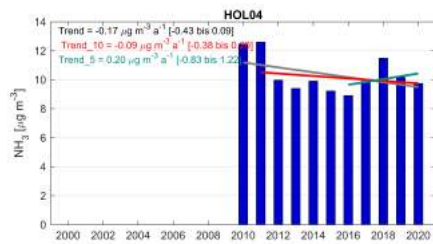
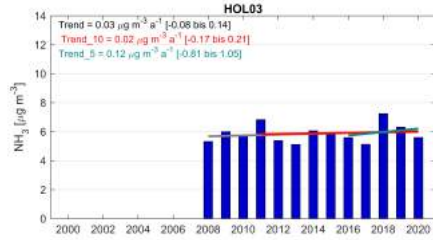
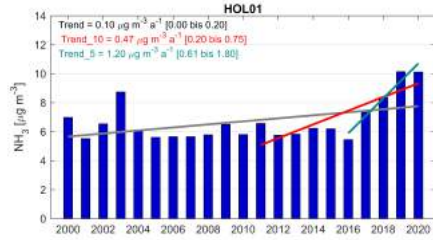
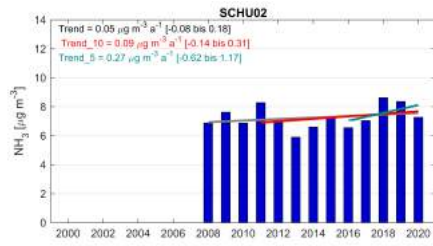
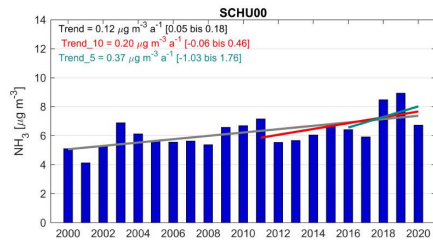
UR01, UR02, UR03

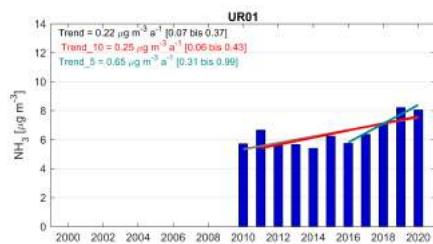
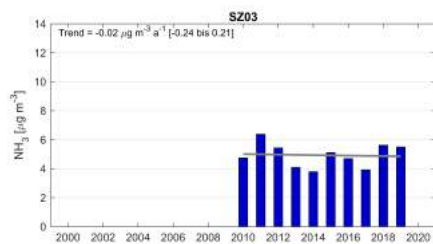
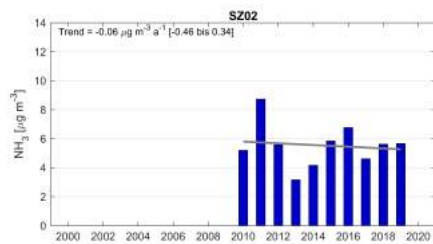
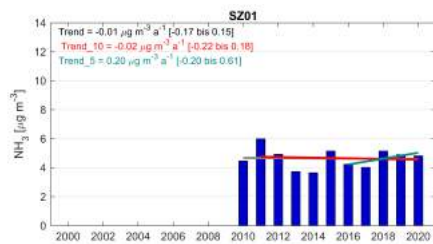
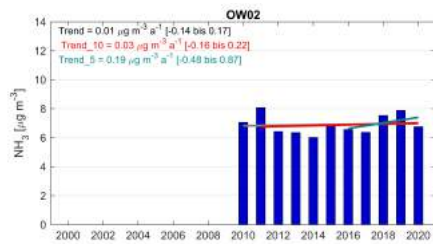
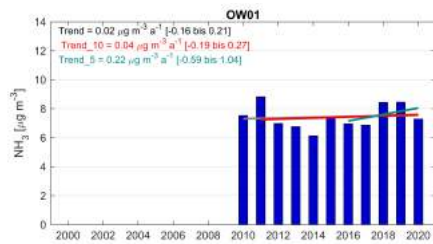
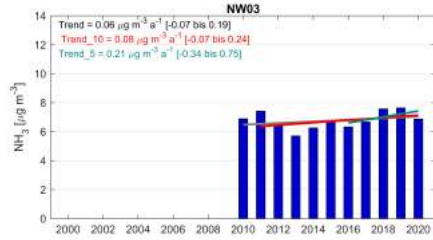
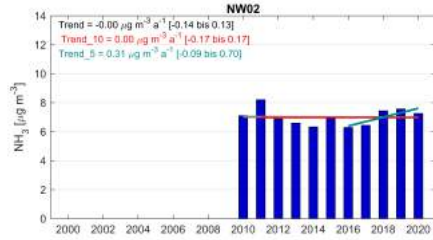
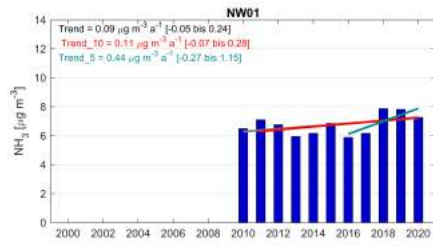
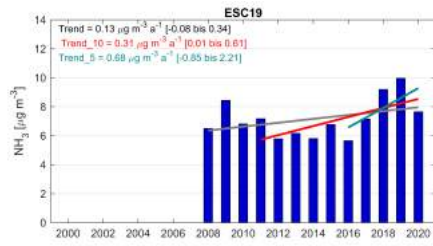


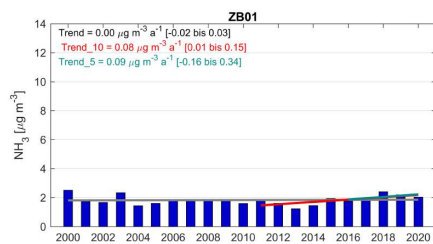
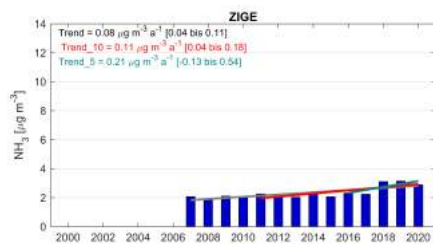
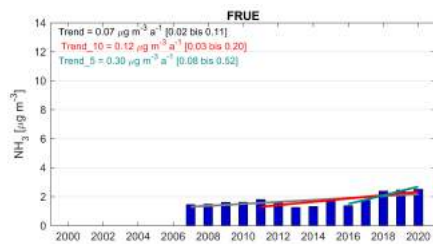
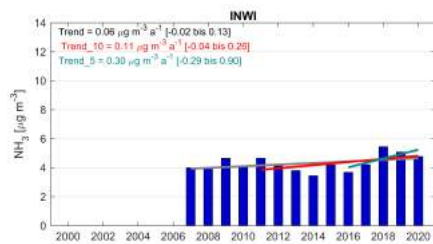
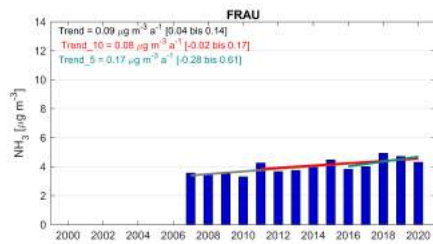
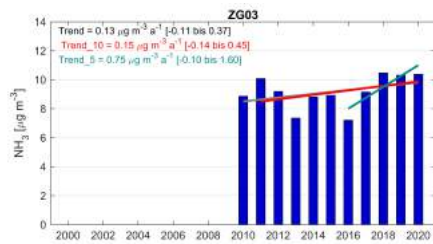
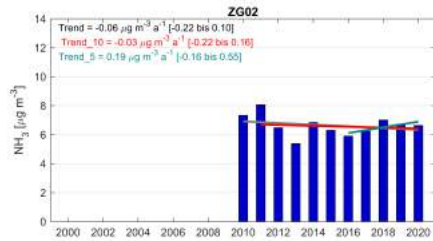
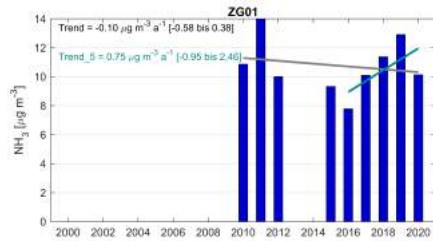
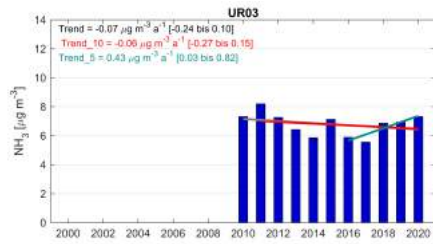
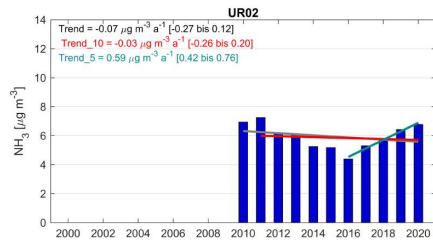
ZG02, ZG03

5.5.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkt

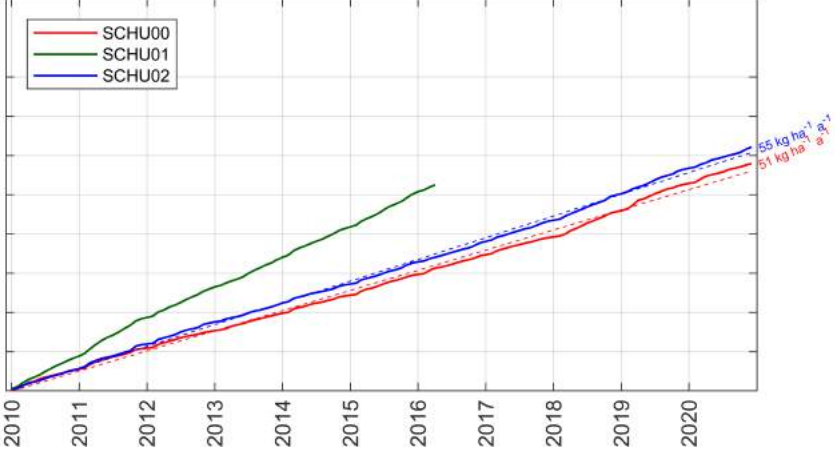
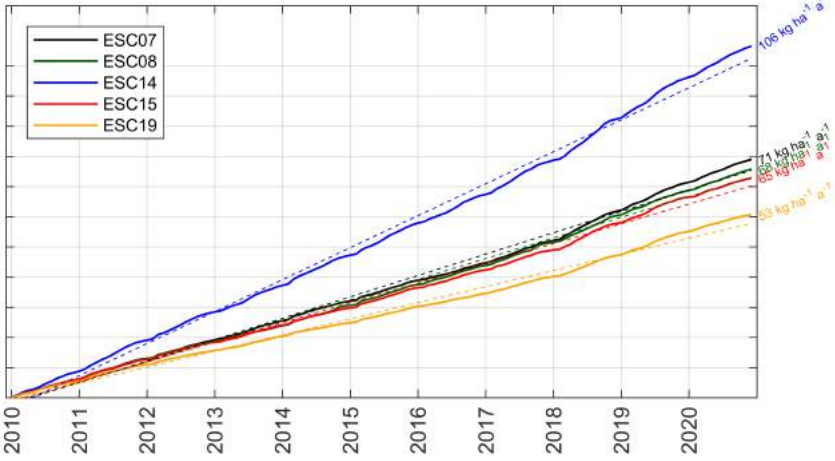
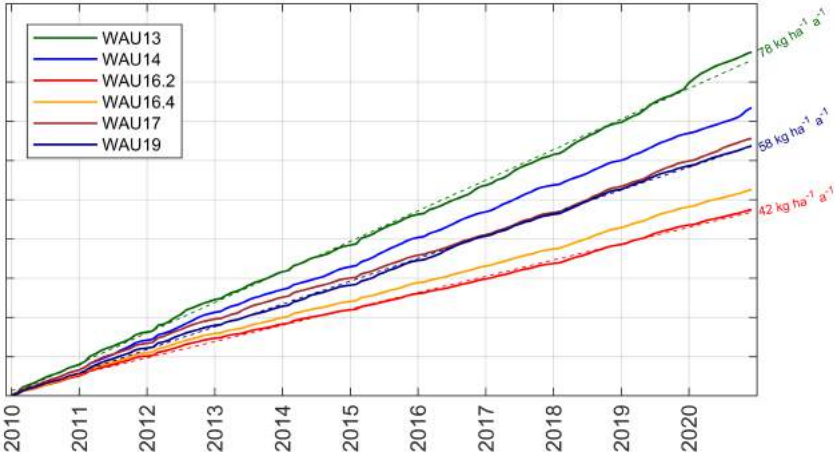


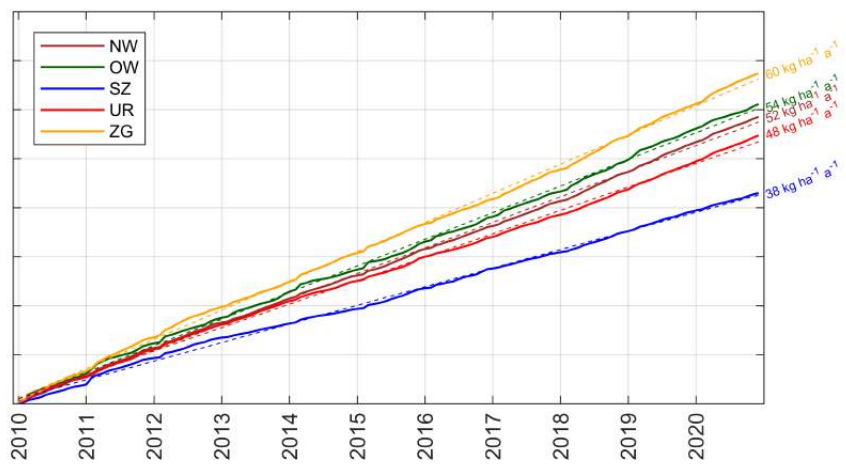
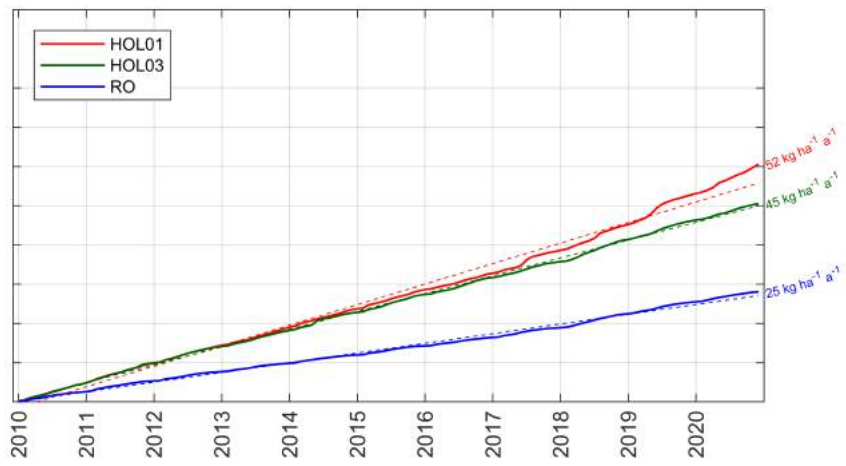
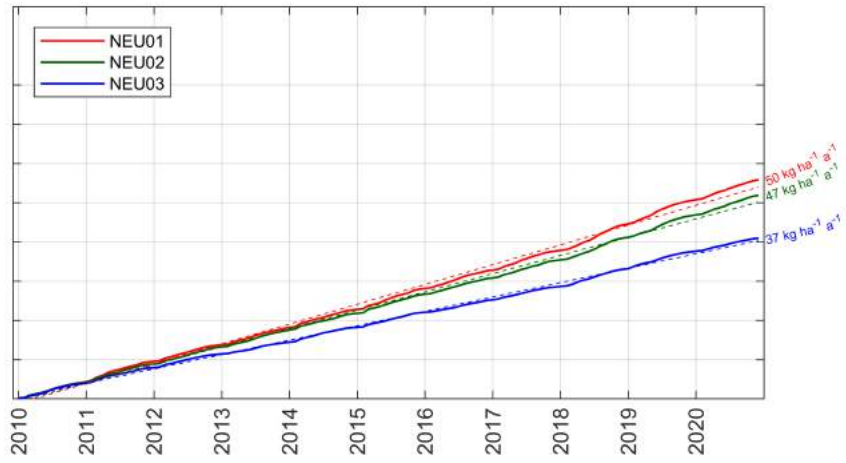


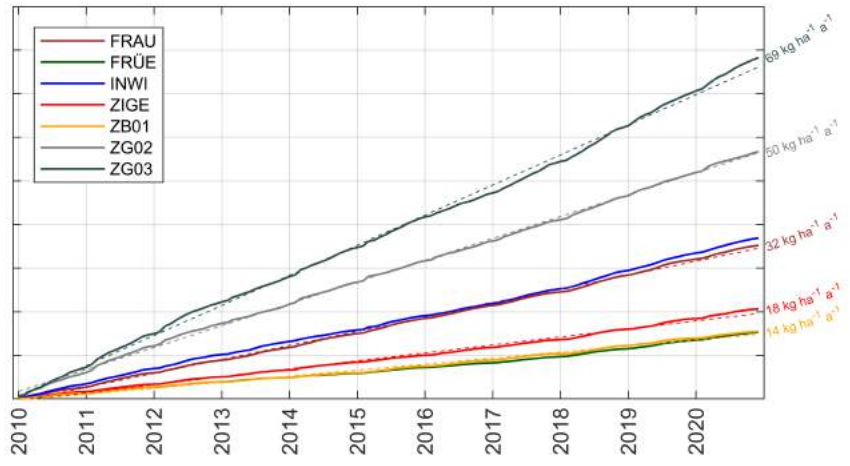




5.6 Frachten

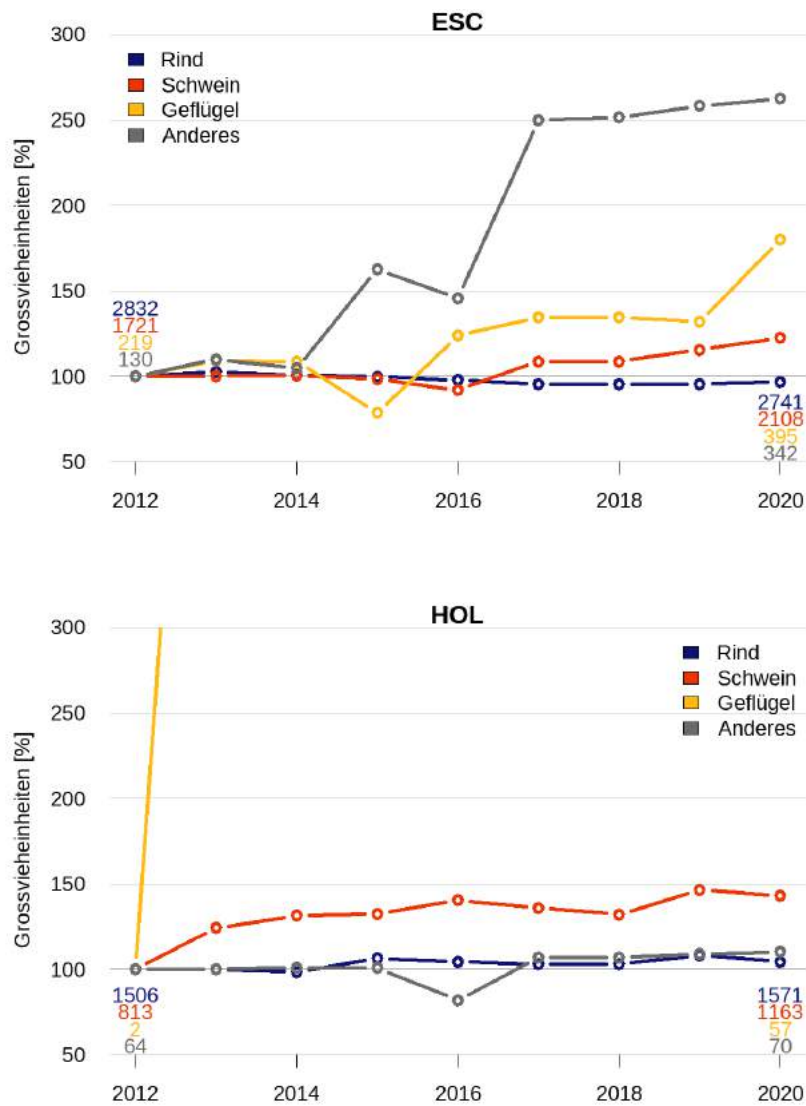




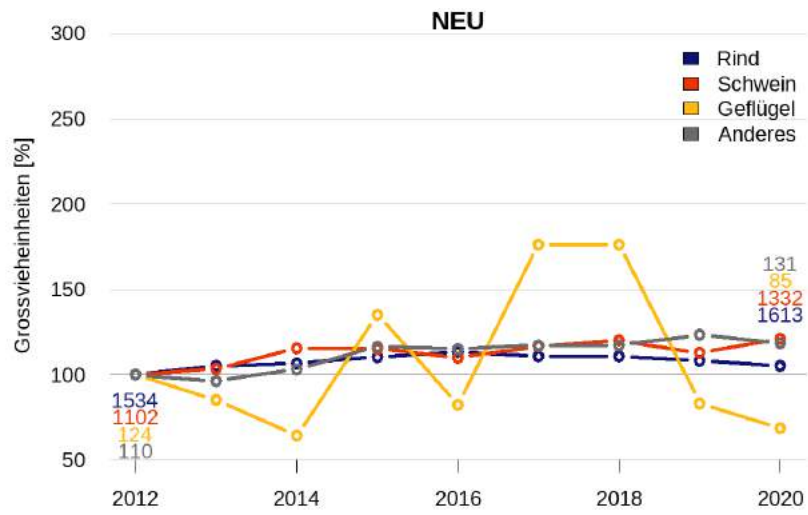


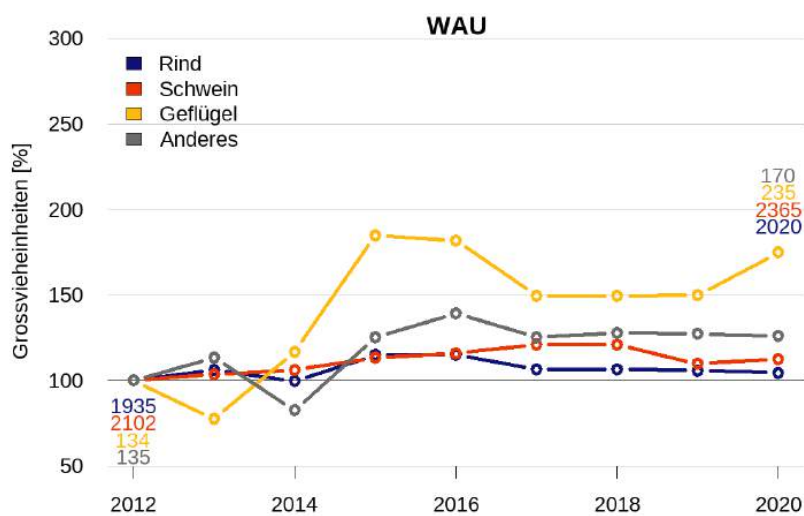
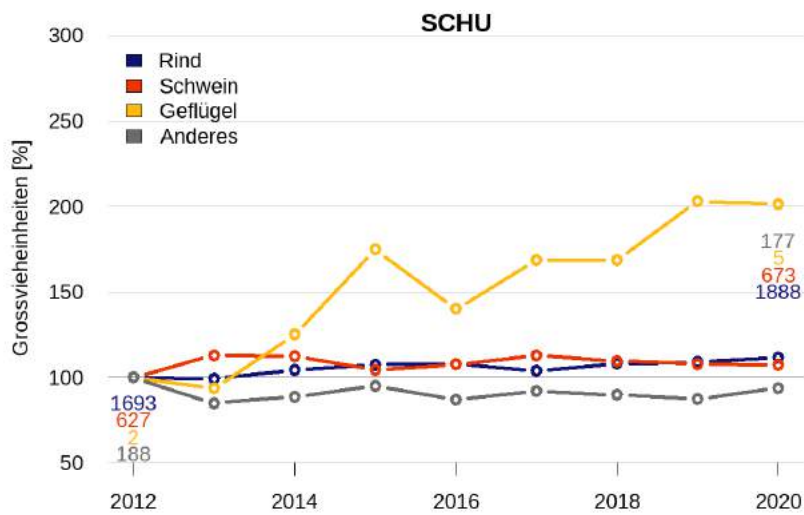
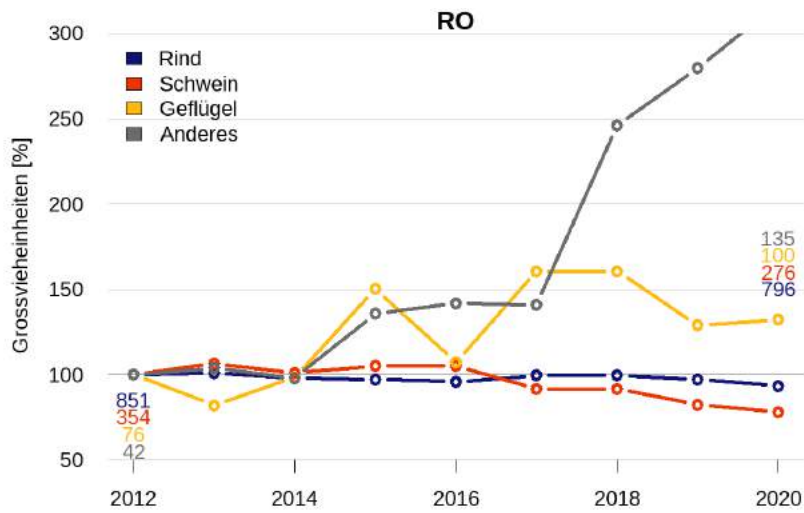
5.7 Tierzahlen

Einige Tierzahlen sind in dieser Darstellung nicht aussagekräftig, da die Anfangsmenge an Tieren sehr gering war (z. B. Geflügel in Holderhus). Unter <Anderes> fallen Pferde, Schafe, Ziegen, Hirsche, Lamas und Alpakas.⁴⁹



⁴⁹Auszug aus der LAWIS-Datenbank, persönliche Kommunikation mit Peter Bucher, August 2020





5.8 Anmerkungen zur statistischen Analyse

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

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

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

Ein Vertrauensintervall gibt an, innerhalb welcher Grenzen der Parameter mit 95 % Wahrscheinlichkeit (100- 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.