

AMMONIAK-MESSBERICHT



Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2018

Version: 15.11.2019
Autorenschaft: Hannah Wey, inNET Monitoring AG
Susanne Bieri, inNET Monitoring AG
Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG
Titelbild: Hannah Wey

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 - 2018) den Critical Level von $3 \mu\text{g m}^{-3}$ an 13 von 17 Messstellen zum Teil sehr deutlich**. Über alle Messgebiete gerechnet beträgt dieser Faktor 1.7. 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**, wobei die Messgebiete Eschenbach und Neudorf eine statistisch signifikante Veränderung verzeichnen ($+0.26$ und $+0.16 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$). Die Messgebiete des Zentralschweizer Ressourcenprojekts mit Daten ab 2010 zeigen **gleichbleibende und rückläufige Tendenzen**, wobei aber kein Messgebiet eine statistisch signifikante Abnahme der Ammoniakkonzentration zeigt. Von den kantonalen Messpunkten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen im Kanton Zug (Inwil, Frauental, Fruebüel, Zigerhüttli, Zugerberg) mit Messungen seit 2007 zeigen drei Stationen **gleichbleibende Ammoniakimmissionen** (Inwil, Fruebüel, Zugerberg). Die Messpunkte Frauental und Zigerhüttli verzeichnen eine **statistisch signifikante Zunahme** ($+0.09$ und $+0.06 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$).

In früheren Jahren zeigten die Ammoniakmissionen im Jahresgang eine deutliche **Saisonalität** mit je einem Peak im Frühling und Herbst. Für das Jahr 2018 gilt das, insbesondere für intensiv bewirtschaftete Gebiete, nicht mehr. Nach einem ersten Anstieg im Frühling bleiben die Konzentrationen durch den Sommer auf konstant hohem Niveau. Erst im Winter sinken die Konzentrationen wieder.

Durch diese hohen Sommerkonzentrationen ist im Jahre 2018 **an 39 von 40 aktiven und langfristigen Messpunkten eine höhere Ammoniakkonzentration als 2017** gemessen worden, womit negative Trends, also eine langfristige Abnahme der Konzentration, abgeschwächt werden und sich positive verstärken. Diese Beobachtung kann unter anderem mit der aussergewöhnlichen meteorologischen Situation erklärt werden: Der sehr **heisse und trockene Sommer 2018** führte zu einer verstärkten Ammoniakbildung und einer längeren Verweilzeit in der Atmosphäre während der Sommer- und Herbstmonate, was in einem höheren Jahresmittel resultiert. Vorausgesetzt werden dabei gleichbleibende Emissionen, obwohl empfohlen wird, Gülle nur bei kühlem und feuchtem Wetter auszubringen. Literaturangaben zum Zusammenhang zwischen Gülleeffizienz und Lufttemperatur ist jedoch spärlich und sollten untersucht werden, um den Landwirten faktenbasierte Empfehlungen geben zu können.

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 6 -
1.1	Richtwerte und Beurteilung	- 9 -
1.2	Übersicht Messungen in der Zentralschweiz	- 11 -
1.3	Messperioden aller Messpunkte.....	- 13 -
1.4	Qualitätssicherung der Messungen.....	- 15 -
1.4.1	Messunsicherheit Passivsammler	- 15 -
2	NH ₃ -Belastung	- 16 -
2.1	Mittlerer Jahresgang	- 16 -
2.2	Mehrjahresmittelwerte	- 17 -
2.4	µg m ⁻³	- 18 -
2.3	Verlauf der Ammoniakkonzentration.....	- 19 -
2.4	Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung.....	- 23 -
3	Trendanalyse	- 25 -
3.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	- 25 -
3.2	Jahresmittel-Trends nach Messpunkten	- 28 -
3.3	Stickstofffrachten durch Ammoniak	- 32 -
3.4	Einfluss der Meteorologie auf NH ₃ -Trends.....	- 37 -
4	Diskussion.....	- 38 -
5	Anhang	- 40 -
5.1	Detaillierte Standortbeschreibungen	- 40 -
5.1.1	Wauwil, Luzern	- 40 -
5.1.2	Eschenbach, Luzern	- 41 -
5.1.3	Neudorf, Luzern.....	- 42 -
5.1.4	Schüpfheim, Luzern	- 43 -
5.1.5	Holderhus, Luzern	- 44 -
5.1.6	Root Michaelskreuz, Luzern	- 45 -
5.1.7	Nidwalden	- 46 -
5.1.8	Obwalden	- 47 -
5.1.9	Schwyz	- 48 -
5.1.10	Uri	- 49 -
5.1.11	Zug	- 50 -
5.1.12	Rigi-Seebodenalp (NABEL).....	- 52 -

5.2	Charakterisierung der Messpunkte	- 53 -
5.3	Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten	- 55 -
5.4	Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2010 - 2018)..	- 56 -
5.5	Trendberechnungen	- 57 -
5.5.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	- 57 -
5.5.2	Jahresmittel-Trends nach Standort	- 58 -
5.6	Frachten.....	- 63 -
5.7.	Anmerkungen zur statistischen Analyse	- 65 -

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 zu Bildung von sekundärem Feinstaub bei und hat somit negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Schliesslich ist Lachgas (N_2O), welches durch eine chemische Transformation von Ammoniak entstehen kann, ein klimawirksames Gas mit einem Treibhausgaspotential von von 300 äq CO_2 .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 2016 betragen die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft landesweit 53.2 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.

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]

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

⁴ FOEN (2018): Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Submission of March 2018 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment FOEN, Air Pollution Control and Chemical Division, Bern.

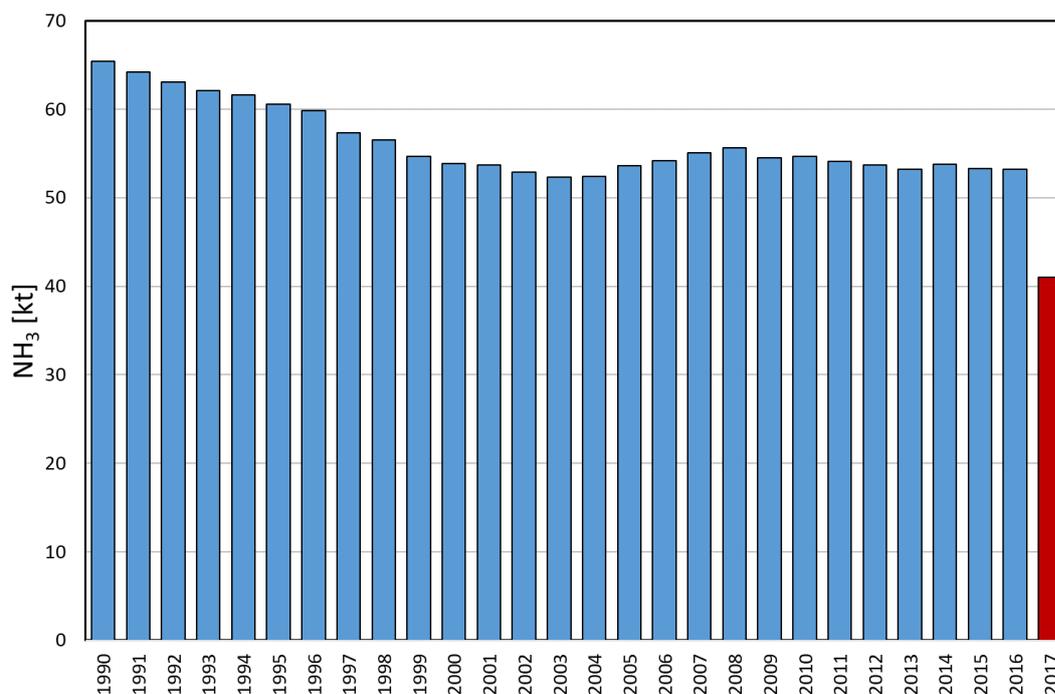


Abbildung 1: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft in der Schweiz von 1990 bis 2016.⁴ Der rote Balken zeigt den vom BAFU kommunizierten Zielwert für 2017.

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 Kanton Zug wurde der Massnahmenplan «Ammoniak 2016 bis 2030» erarbeitet und verabschiedet. Jedes dieser Projekte enthält verschiedene Massnahmen zur Reduktion der NH₃-Verluste 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 nationale 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»⁵ und «Einführung Ressourceneffizienzbeiträge für emissionsarme Ausbringtchniken».⁶ 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.⁷ Bei mehr als 90 % der Waldökosysteme und bei rund 70 % der (halb)natürlichen Ökosysteme wurden im Jahr 2010 die Critical Loads für Stickstoff überschritten.⁸ Der gesamtschweizerische Ammoniak-Immissionsmessbericht kommt weiter zum Schluss, dass die Ammoniakkonzentrationen seit dem Jahr 2000 weder zu- noch abgenommen haben (Abbildung 2).⁹

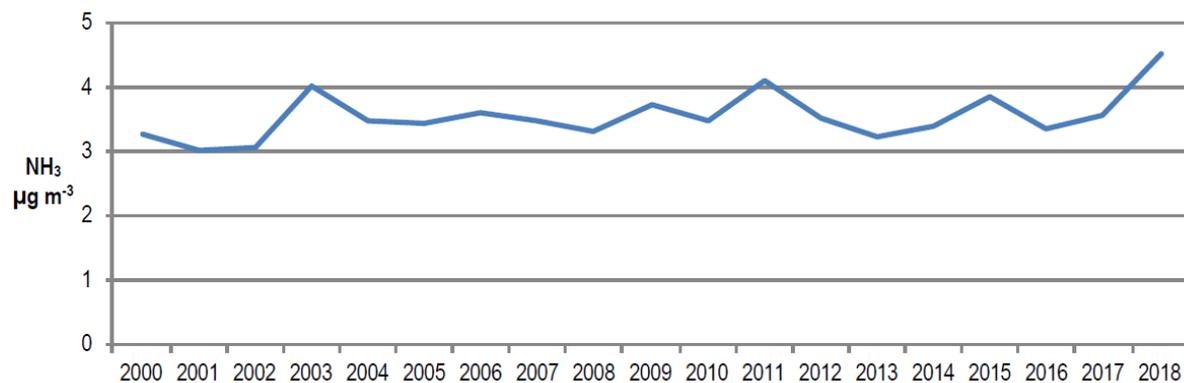


Abbildung 2: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen von 13 Immissions-Messstandorten in der Schweiz, an denen seit 2000 durchgehend gemessen wird (Thöni et al. (2019)⁹). Die in den Jahren 2003, 2011 und 2018 sichtbaren Peaks werden in Kapitel 4 diskutiert.

⁵ HODUFLU ist ein Internetprogramm zur einheitlichen Verwaltung von Hof- und Recyclingdüngerverschiebungen in der Landwirtschaft.

⁶ BAFU und BLW (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114 S.

⁷ Seitler et al. (2016): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 105 S.

⁸ Rihm, B., Achermann B. (2016): Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1642: 78p.

⁹ Thoeni, L., Seitler, E., Meier, M., & Kosonen, Z. (2019). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2018. FUB – Forschungsstelle

1.1 Richtwerte und Beurteilung

Zur Beurteilung der Stickstoffeinträge stehen *Critical Loads* und *Critical Levels* der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)¹⁰ zur Verfügung. *Critical Loads* bezeichnen die Gesamtstickstofffrachten, welche ein Ökosystem verkraften kann, ohne dass nachhaltige Veränderungen zu erwarten sind (Deposition).

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 beziehen sich auf die Konzentration von Ammoniak in der Atmosphäre (Immission). Als verkraftbare Langzeitbelastungen wurden folgende *Critical Levels* für Ammoniak festgelegt:

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

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) ist der Frage nachgegangen, ob es Sinn macht, einen Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) festzulegen¹¹ 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 gesamtschweizerischen Mittel knapp ein Viertel zur gesamten Ammoniak-Konzentration 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.

¹⁰ UNECE (2007): Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts. ECE/EB.Air/WG.5/2007/3

¹¹ Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (2014): Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge, Bern

- Entscheidend zur Ammoniak-Minderung 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.¹²

¹² Eidgenössische 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 Wetterschutzgehäuse montiert (Abbildung 3). Alle Messpunkte sind in der Tabelle 3 im Anhang (Kapitel 5.2) im Detail charakterisiert. Detailliertere Infos zu den Messgebieten sind im Anhang Kapitel 5.1 zu finden.

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} Im vorliegenden Bericht werden im Auftrag der Zentralschweizer Umweltdirektionen (ZUDK) die Ammoniak-Messdaten der gesamten Zentralschweiz bis Ende 2017 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 Kantone 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.

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

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

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

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

¹⁷ Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2018): Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2016, inNET Monitoring AG



Abbildung 3: Zwei NH₃-Passivsammlerröhrchen im Wetterschutzgehäuse.

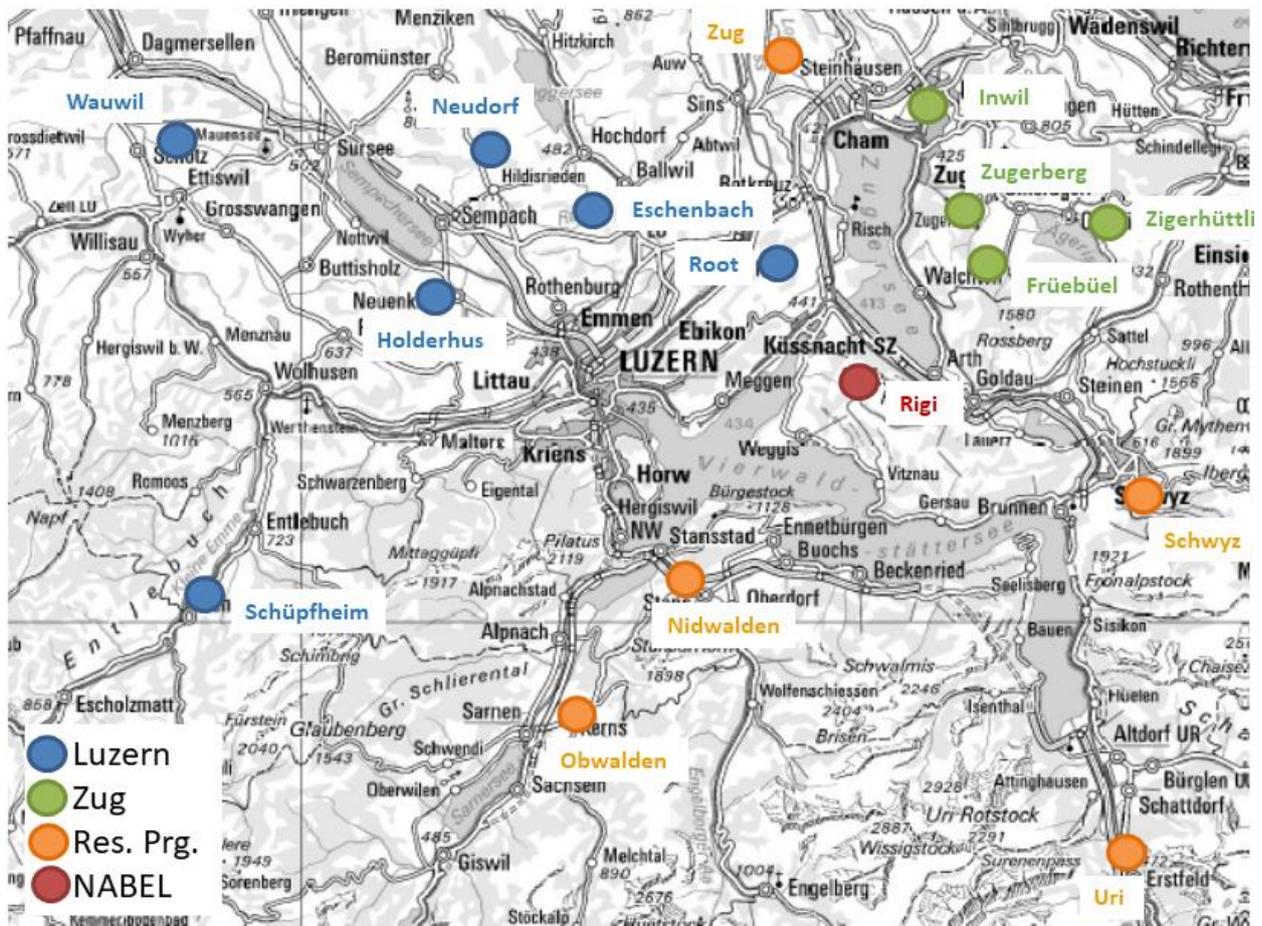


Abbildung 4: Gesamtübersicht der Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz: Die Punkte stehen entweder für Messgebiete, in welchen in der Regel mehrere Messpunkte vorhanden sind, oder für einzelne Messpunkte.

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.¹⁸

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.

¹⁸ Seitler, E., Thöni, L., Schnyder, R., Rihm, B. (2013): Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz, Beschreibung der Standorte und Daten. Bezugsquelle: FUB, 8640 Rapperswil

1.4 Qualitätssicherung der Messungen

1.4.1 Messunsicherheit Passivsammler

Die Messung der Ammoniakkonzentration erfolgt mittels Radiello-Sammlern. 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 Radiello-Passivsammler eine erweiterte Messunsicherheit²² von $0.6 \mu\text{g m}^{-3}$ im Jahresmittel ermittelt. 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.²³ 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.

²² Dämmgen et al. (2010): Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig, Landbauforschung Sonderheft 337

²³ Bucher, 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 Messstandorte sind im Anhang (Kapitel 5.4) 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 geringer 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 anstellt werden.

Die Messungen in Zug und Obwalden zeigen, dass Standorte mit intensiver Tierhaltung einen deutlichen Höchstwert im März zeigen (Abbildung 6). Bei einigen Standorten sind, wenn auch in geringerem Masse, nochmals erhöhte Werte im November zu beobachten. Der bei allen Standorten 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 Stationen 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 Frühjahrs- und Herbstpeak, was für diese Hypothesen spricht. Ausserdem zeigen diese Messpunkte eine viel kleinere Grundbelastung zwischen Mai und August.

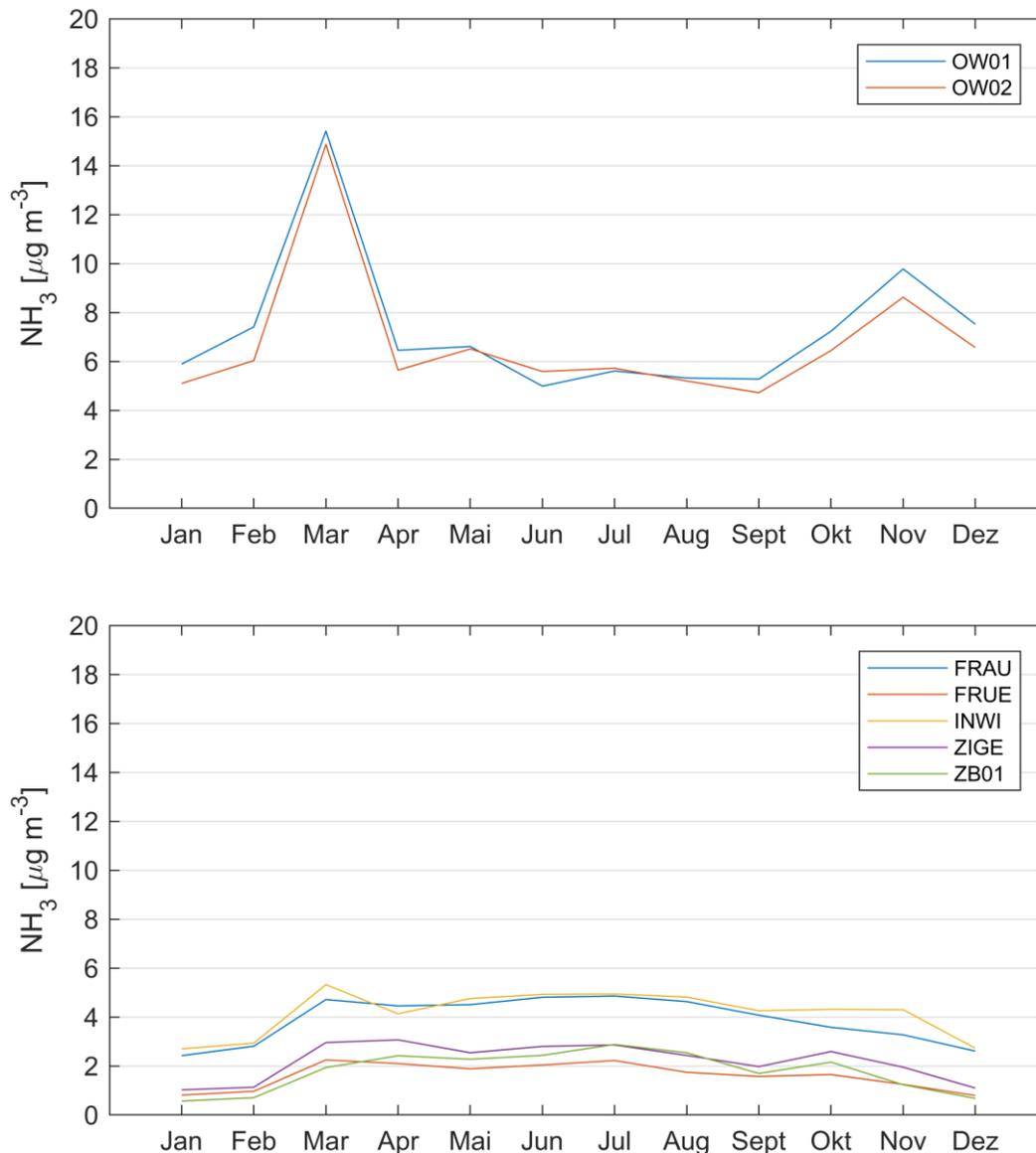


Abbildung 6: Vergleich des Jahresgangs unterschiedlicher Messpunkte mit unterschiedlicher Bewirtschaftung. Mittelung von 2010 bis 2018. Oben: Messpunkte von Obwalden. Unten: Messpunkte des Kantons Zug.

2.2 Mehrjahresmittelwerte

Die Jahresmittel der Ammoniak-Konzentrationen ausgewählter Messpunkte über die jeweilige Messperiode sind auch im Anhang eingefügt (Kapitel 5.3). Tabelle 1 und Abbildung 7 zeigen die mehrjährigen Jahresmittel der Ammoniakkonzentration der verschiedenen Messgebiete.²⁴ Der *Critical Level* von

²⁴ Im Vergleich zu den letztjährigen Berichten sind bei den Messgebiete Schüpfheim und Obwalden je ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (SCHÜ01 und OW-03), da diese Messpunkte im Jahr 2016 aufgehoben wurden.

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

Tabelle 1: Mehrjahresmittelwerte (2010 - 2018) der Ammoniakkonzentration in den verschiedenen Messgebieten.

Messgebiet	Mehrjähriges Mittel (2010 – 2018) NH ₃ -Konzentration
Wauwil (WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19)	8.0 µg m ⁻³
Eschenbach (ESC07, ESC08, ESC14, ESC15, ESC19)	9.1 µg m ⁻³
Holderhus (HOL01, HOL03)	6.1 µg m ⁻³
Schüpfheim (SCHÜ00, SCHÜ02)	6.8 µg m ⁻³
Root, Michaelskreuz (RO)	3.2 µg m ⁻³
Neudorf (NEU01, NEU02, NEU03)	5.6 µg m ⁻³
Nidwalden (NW-01, NW-02, NW-03)	6.7 µg m ⁻³
Obwalden (OW-01, OW-02)	7.0 µg m ⁻³
Schwyz (SZ-01, SZ-02, SZ-03)	5.0 µg m ⁻³
Uri (UR-01, UR-02, UR-03)	6.2 µg m ⁻³
Zug * (ZG-02, ZG-03)	7.7 µg m ⁻³
Kloster Frauental (FRAU)	4.0 µg m ⁻³
Früebüel (FRÜE)	1.6 µg m ⁻³
Inwil (INWI)	4.2 µg m ⁻³
Zigerhüttli (ZIGE)	2.3 µg m ⁻³
Zugerberg 1 (ZB01)	1.7 µg m ⁻³
Rigi-Seebodenalp (RIGI)	2.4 µg m ⁻³

*mit ZG-01, ZG-02 und ZG-03:

Alle vorhandenen Messwerte werden verwendet: 8.63 µg m⁻³

Vandalenjahre werden überall weggelassen: 8.77 µg m⁻³

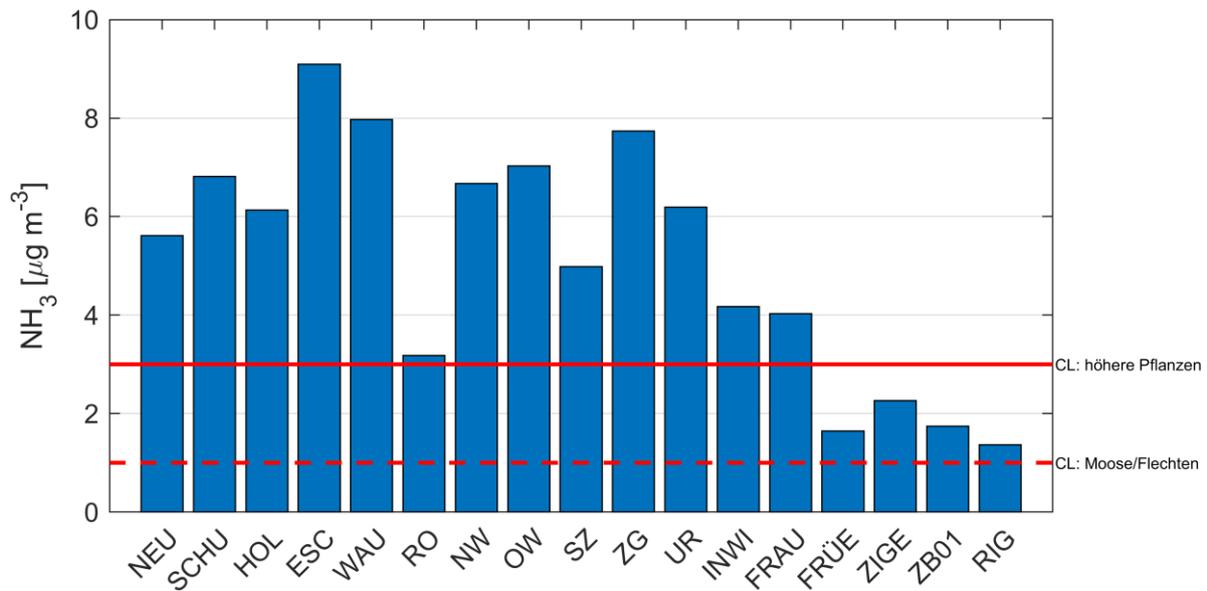


Abbildung 7: Mehrjähriges Mittel (2010 - 2018) der Ammoniakkonzentration in den einzelnen Messgebieten. Die rote ausgezogene Linie kennzeichnet den *Critical Level* (CL) für höhere Pflanzen, die rote gestrichelte Linie denjenigen für empfindliche Moose und Flechten.

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 mehreren Stationen überschritten werden (Abbildung 8). Die drei kantonalen Messpunkte Frübüel, Zigerhüttli und Zugerberg sind in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen. Der *Critical Level* für Moose und Flechten wird an allen drei Messpunkten überschritten.

Im Jahr 2018 wurden im Vergleich zu den Vorjahren 2016 und 2017 zum zweiten Mal in Folge eine Erhöhung der Ammoniakkonzentrationen gemessen, mit Ausnahme von Zigerhüttli, wo das erste Mal eine so deutliche Steigerung zu beobachten ist. Bei allen kantonalen Messpunkten ist dieser Anstieg sprunghaft und die gemessene Konzentration die höchste aller bisherigen Messungen. Bei den Messpunkten des Ressourcenprojekts springt die Konzentration 2018 ebenfalls nach oben, allerdings liegen die Werte aus dem Jahre 2011 höher oder zumindest auf vergleichbarer Höhe.

An den meisten Standorten 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 war das Extremjahr 2018 geprägt von hohen Sommertemperaturen und einer langanhaltenden Trockenheit.²⁵ Dieser Umstand kann die hohen Ammoniakimmissionswerte

²⁵ Wey, H., Ruckstuhl, Ch. (2019): Übersicht über die Immissionsmessungen im Kanton Uri mit Fokus auf das Jahr 2018. Zusatzkapitel 9: Das meteorologische Extremjahr 2018 im Kanton Uri. inNET AG.

2018 erklären. Auf den Einfluss der Witterung auf die Ammoniakkonzentration wird im Kapitel 3.4 näher eingegangen.

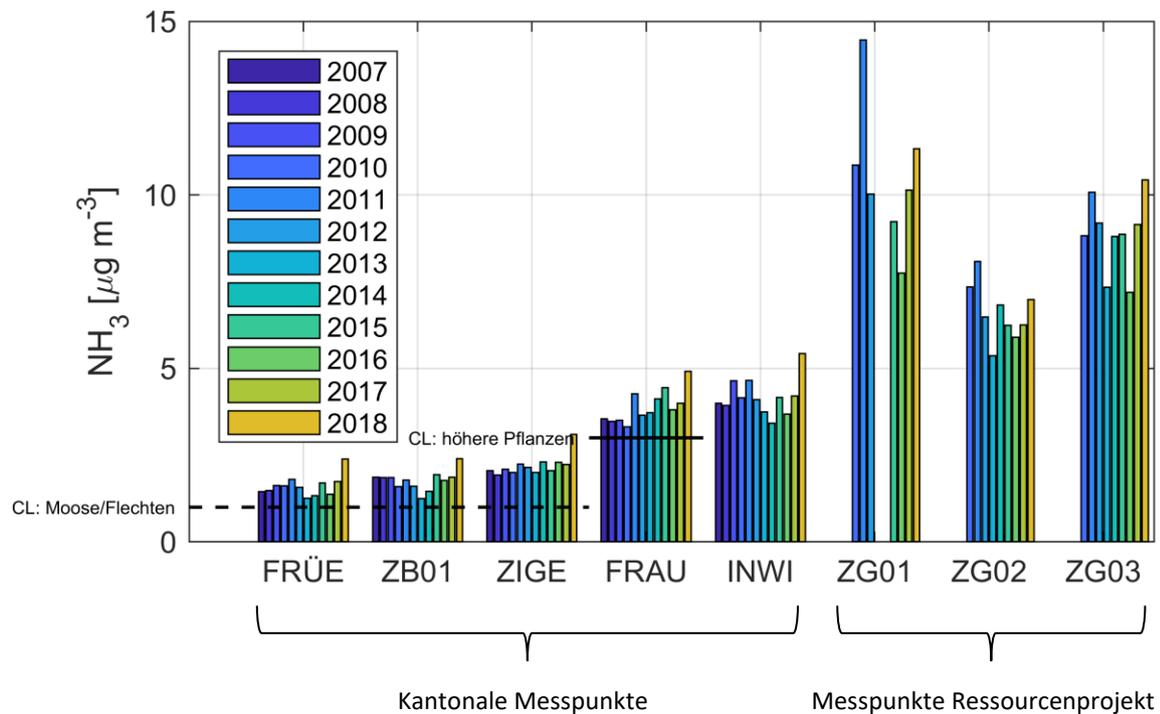


Abbildung 8: Jahresmittel (2007 bis 2018) der Ammoniakkonzentration an den einzelnen Messpunkten im Kanton Zug. Für ZG01 konnten aufgrund von Datenlücken keine gültigen Jahresmittel für 2013 und 2014 berechnet werden. Die schwarze ausgezogene Linie kennzeichnet den *Critical Level* (CL) für höhere Pflanzen, die schwarze gestrichelte Linie den *Critical Level* (CL) für empfindliche Moose und Flechten.

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne 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 sticht das Jahr 2018, wie übrigens schon 2016 und 2017, 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 Stationen mit etwa $8 \mu\text{g m}^{-3}$ deutlich höher. Der heisse Sommer 2018 mit der aussergewöhnlichen Trockenheit kann dazu beigetragen haben, dass erstens mehr Ammoniak in die Luft entwich und zweitens dort verweilen konnte.²⁶

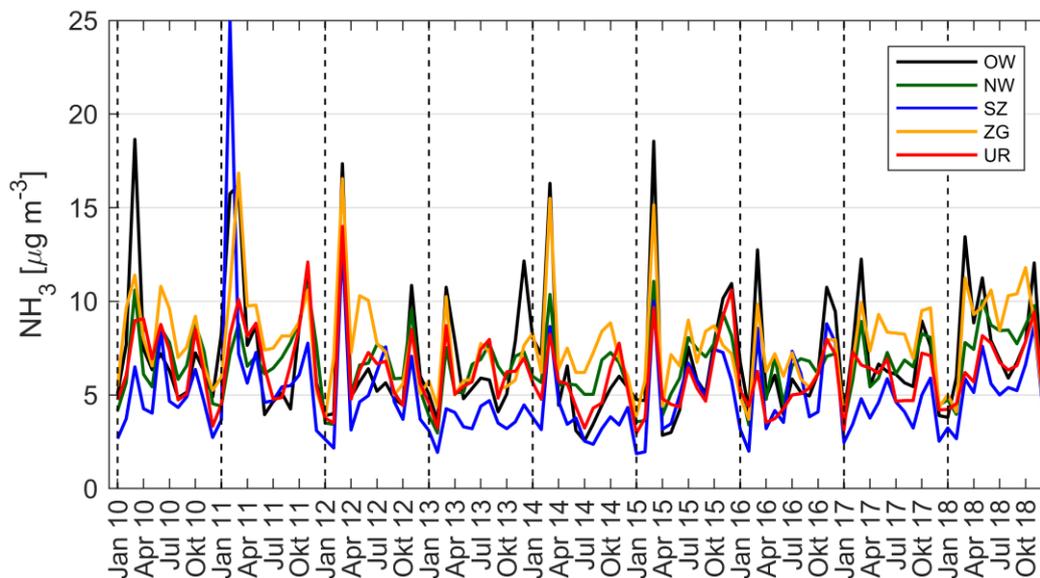


Abbildung 9: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne Luzern.

²⁶ Wey, H., Ruckstuhl, Ch. (2019): Übersicht über die Immissionsmessungen im Kanton Uri mit Fokus auf das Jahr 2018. Zusatzkapitel 9: Das meteorologische Extremjahr 2018 im Kanton Uri. inNET AG.

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration im Kanton Zug seit 2010 ist in Abbildung 10 dargestellt. Wie bereits in den Vorjahren können die diversen Messstandorte in drei Gruppen eingeteilt werden:

- **Hohe Belastung:** Passivsammler des Ressourcenprojekts. Der Verlauf der Ammoniakkonzentration ist mit denjenigen der übrigen Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweiz vergleichbar (Abbildung 9). All diese Standorte liegen in Landwirtschaftsgebiet. Von Februar bis November 2018 liegen höhere Konzentrationen vor, das Abflachen während der Sommermonate ist kaum erkennbar.
- **Mittlere Belastung:** Die Messpunkte Inwil (INWI) und Frauental (FRAU) weisen eine mittlere Ammoniakbelastung auf. Beide Standorte zeigen einen mittleren Anstieg der Ammoniakkonzentration im Frühling 2018, dieser verläuft dann auf stabilem Niveau weiter bis Ende Herbst 2018.
- **Tiefe Belastung:** Die Messpunkte Frübüel (FRÜE), Zigerhüttli (ZIGE) und Zugerberg (ZB01) wurden bewusst in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen und Gegenden mit geringer Belastung platziert. Auch diese drei Standorte fallen 2018 durch einen deutlich sichtbaren Konzentrationsanstieg im Frühling und einem konstant erhöhten Niveau bis Ende Sommer auf.

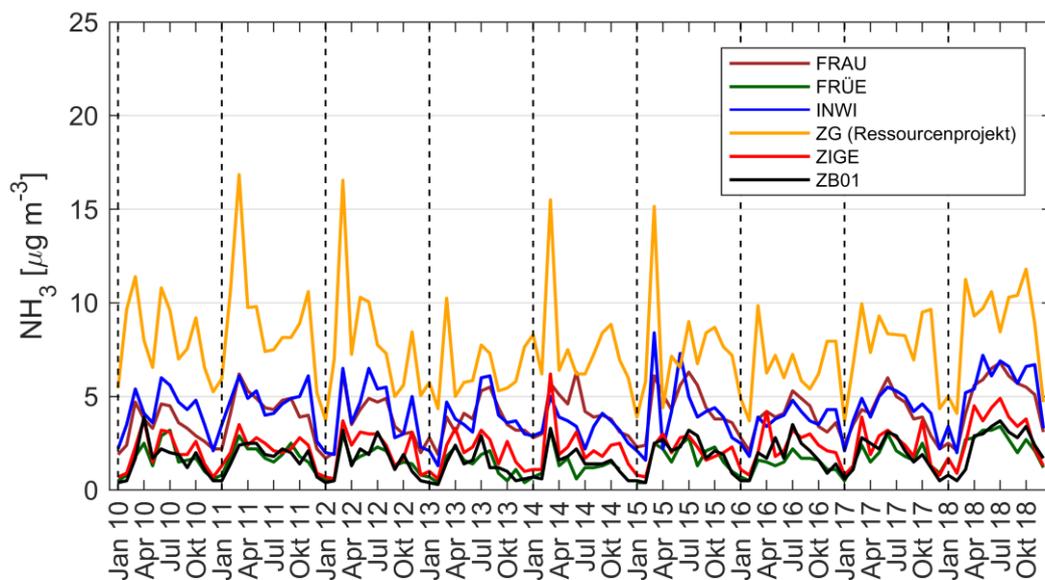


Abbildung 10: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den verschiedenen kantonalen Passivsammler-Standorten in Zug sowie den Zuger Ressourcenprojekt-Standorten (ZG).

Abbildung 11 zeigt schliesslich den Verlauf der Ammoniakkonzentrationen seit Januar 2010 für die Luzerner Standorte, gemittelt pro Messgebiet. 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 2018 ist der Frühlingspeak bzw. der Frühlingsanstieg gut zu erkennen. Das Konzentrationsniveau bleibt im Sommer auf hohem Niveau, teilweise mit einem zweiten Peak im Juli und einem dritten im Oktober. Vor allem bei Eschenbach, Schüpfheim und Neudorf fällt auf, dass die Durchschnittswerte im Sommer bereits zum zweiten Mal in Folge, d.h. nach 2016-2017, deutlich höher liegen.

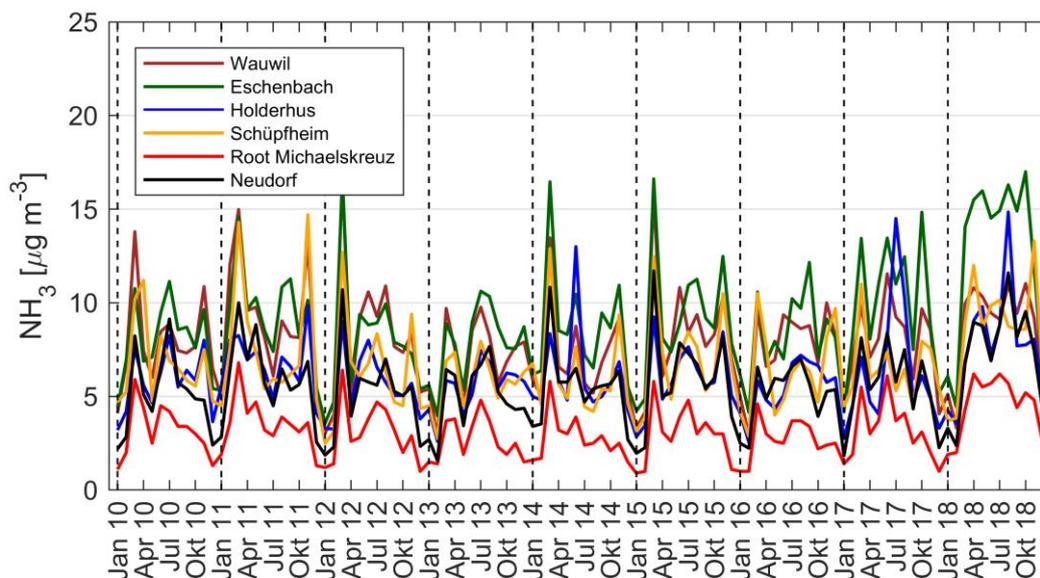


Abbildung 11: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010, gemittelt für jedes Messgebiet im Kanton Luzern.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen der Verläufe der Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2018 festgehalten werden:

- Die Ammoniakkonzentrationen 2018 sind deutlich höher als in den zwei Vorjahren.
- Der Frühjahrespick ist nicht auffallend, meist werden aber gleichbleibend hohe Ammoniakkonzentrationen oder weitere Peaks während der Sommer- und Herbstmonate gemessen.
- Insbesondere Messpunkte in stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten zeigen mindestens zwei Peaks (März und Oktober) und teilweise einen dritten im Juli.

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 im Vorjahres-Bericht²⁷ 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 und 2018 dargestellt (Abbildung 12).

Im Messgebiet Zug sind die von Jahr zu Jahr variierenden Ammoniakbelastungen deutlich erkennbar (Abbildung 12 (a)): Im Jahr 2011 wurde ein ausgeprägter Peak der Ammoniakkonzentration im Monat März gemessen, welcher sich bereits im Februar ankündete. Dieser fiel 2018 deutlich niedriger aus bzw. verschob sich, wohl wegen der sehr kalten Temperaturen im Februar, in den April. Allerdings nehmen danach die Ammoniakkonzentrationen im Sommer nicht ab, sondern bleiben auf konstant hohem Niveau, sodass der in den anderen Jahren sichtbare Herbstpeak im Jahre 2018 bereits wieder

²⁷ Bieri, S., Wey, H. (2018): Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2017, inNET Monitoring AG

ein sinkender Trend ist. Diese Unterschiede können qualitativ mit den meteorologischen Gegebenheiten erklärt werden.

Als Vergleich ist in Abbildung 12 (b) die Ammoniakkonzentration auf Monatsbasis am Messpunkt Zugerberg dargestellt. Hier werden deutlich geringere Ammoniakkonzentrationen gemessen. Auch hier zeigen sich 2018 deutlich höhere Sommerkonzentrationen als in den Vorjahren, mit einem ersten Peak eher verspätet im April.

Die Erklärung über die komplexe Beziehung zwischen Emissionen und Immissionen und Vermutungen über die Ursachen der typischen Jahresgangkurven respektive Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung sind in Kapitel 2.1 festgehalten.

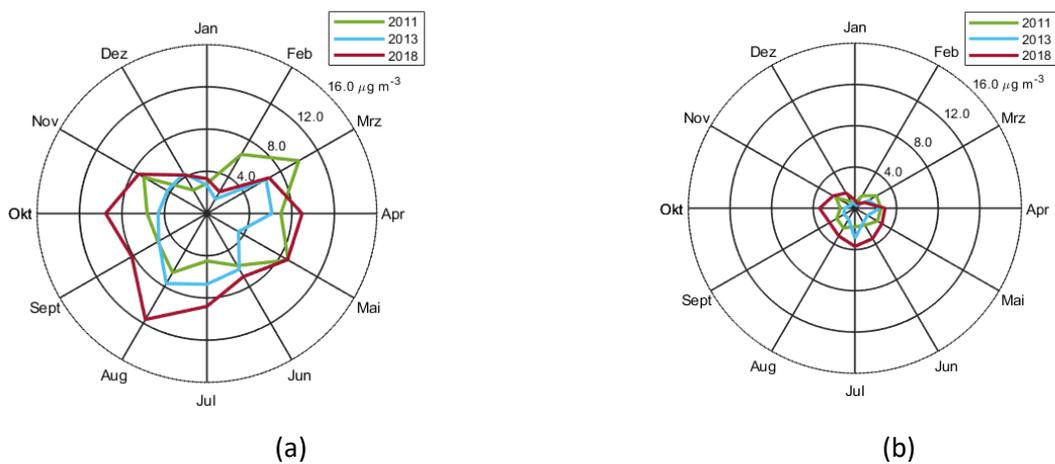


Abbildung 12: Darstellung der Monatsmittelwerte in Netzdiagrammen für (a) das Messgebiet Zug und (b) der Messpunkt Zugerberg für die Jahre 2011, 2013 und 2018.

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 und anschliessend eine Trendberechnung für das jeweilige Messgebiet durchgeführt. Exemplarisch sind hier, wie in den Vorjahresberichten, vier Messgebiete abgebildet, die restlichen Grafiken sind im Anhang in Kapitel 5.5.1 eingefügt. Der Trend ist jeweils als Änderung in $\mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr angegeben. Zusätzlich wird das 95%-Vertrauensintervall des linearen Trends in eckigen Klammern aufgelistet. Ein Vertrauensintervall gibt an, innerhalb welcher Grenzen sich die Parameter wahrscheinlich bewegen. Aus dem Vertrauensintervall lässt sich somit direkt die Signifikanz ablesen. Das Signifikanzniveau (α) in diesem Bericht ist 5 %. Weitere Erklärungen zur statistischen Auswertung sind im Anhang angefügt. Zur Mittelung wurden jeweils nur Messstationen verwendet, welche repräsentativ für die Messgebiete sind und zudem zwischen 2007 und 2017 alle Messwerte aufweisen. Die verwendeten Stationen sind in der Bildlegende aufgeführt.

In allen Messgebieten ist das Ammoniak-Jahresmittel 2018 höher als im Vorjahr, zum Teil sogar sehr deutlich (z. B. Neudorf und Eschenbach). In 5 von 10 Messgebieten wird die höchste seit Messbeginn gemessene Ammoniakkonzentration erfasst (Schüpfheim, Eschenbach, Neudorf, Holderhus, Nidwalden). Dadurch werden die Trends zum zweiten Mal hintereinander positiver (stärkere Zunahme der Ammoniakkonzentration) oder weniger negativ.

- Das Messgebiet Wauwil zeigt über die letzten 11 Jahre schwankende Ammoniakkonzentration mit einem leicht positiven, nicht-signifikanten Trend (Abbildung 13). Nach einem Rückgang zwischen 2011 und 2013 steigen die Werte seither wieder deutlich.
- Im Messgebiet Neudorf (Abbildung 14) und Eschenbach (Abbildung 15) zeichnen sich ähnliche Konzentrationsverläufe ab, wobei der positive Trend hier jeweils signifikant ist.
- Das Messgebiet Nidwalden zeigt neu mit einem neutralen Trend keine Abnahme der Ammoniakkonzentration mehr (Abbildung 16).
- Die im Messgebiet Uri gemessene abnehmende Ammoniakkonzentrationen ($-0.12 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$) ist neu nicht mehr statistisch signifikant. Diese Abnahme hat sich im Vergleich zum Vorjahr abgeschwächt (Trendberechnung 2007-2017: $-0.21 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$).

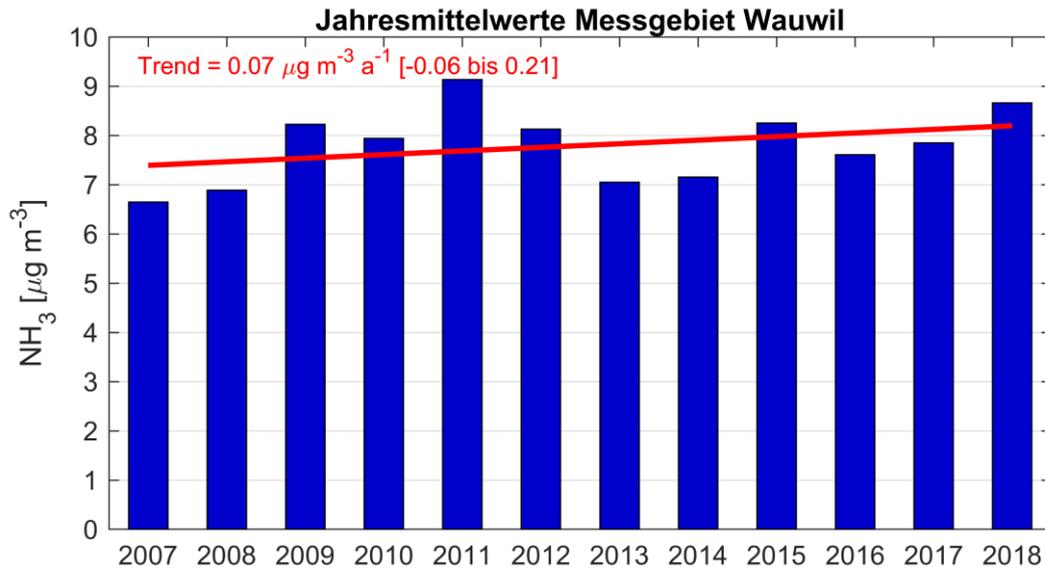


Abbildung 13: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Wauwil (verwendete Stationen zur Trendberechnung: WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19).

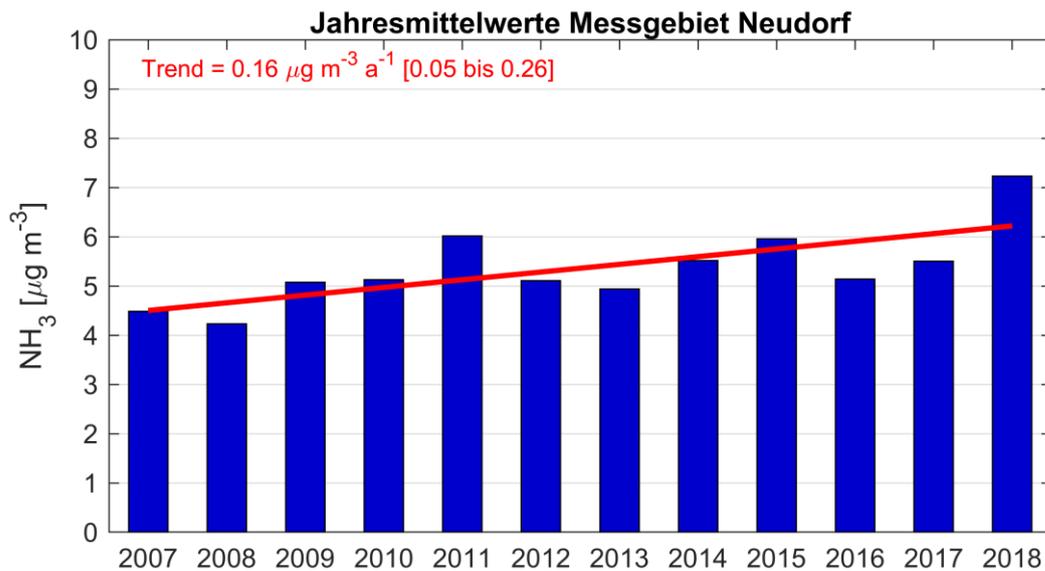


Abbildung 14: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Neudorf (verwendete Stationen zur Trendberechnung: NEU01, NEU02, NEU03).

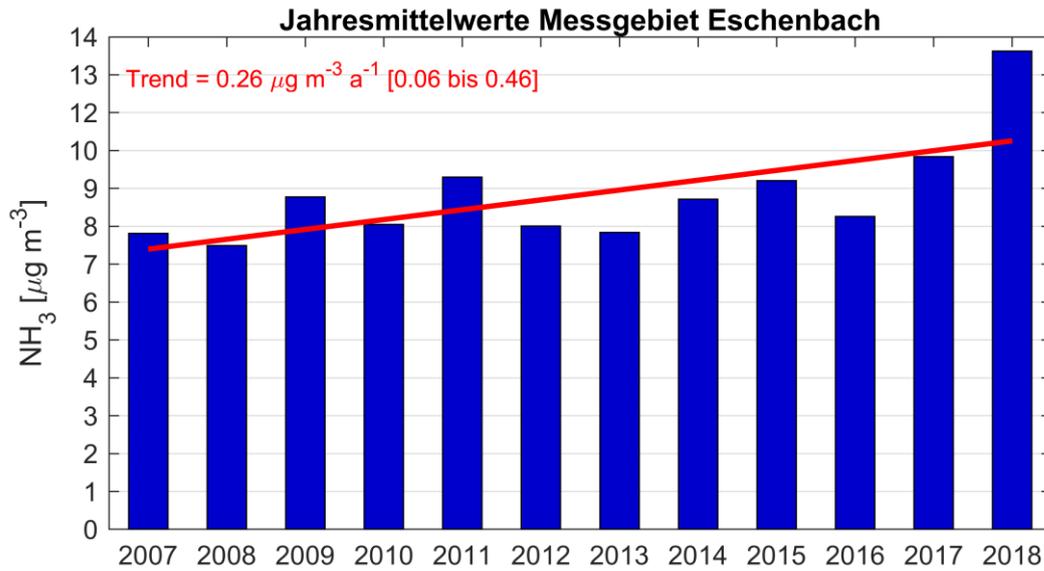


Abbildung 15: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Eschenbach (verwendete Stationen zur Trendberechnung: ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19). Zum besseren Verständnis wurde die y-Achsen-Skala in dieser Abbildung den Messwerten angepasst.

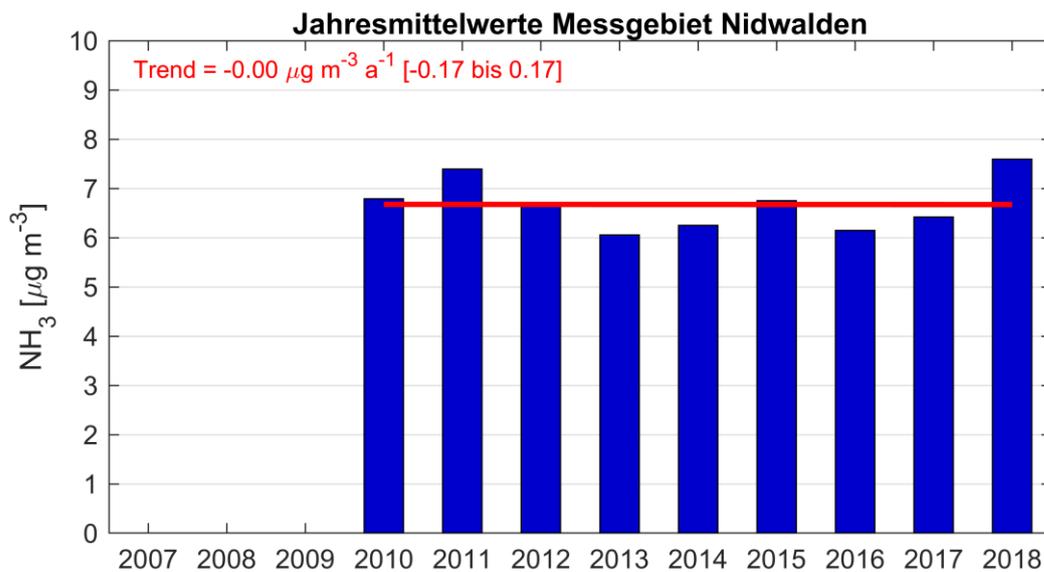


Abbildung 16: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Nidwalden (verwendete Stationen zur Trendberechnung: NW01, NW02, NW03).

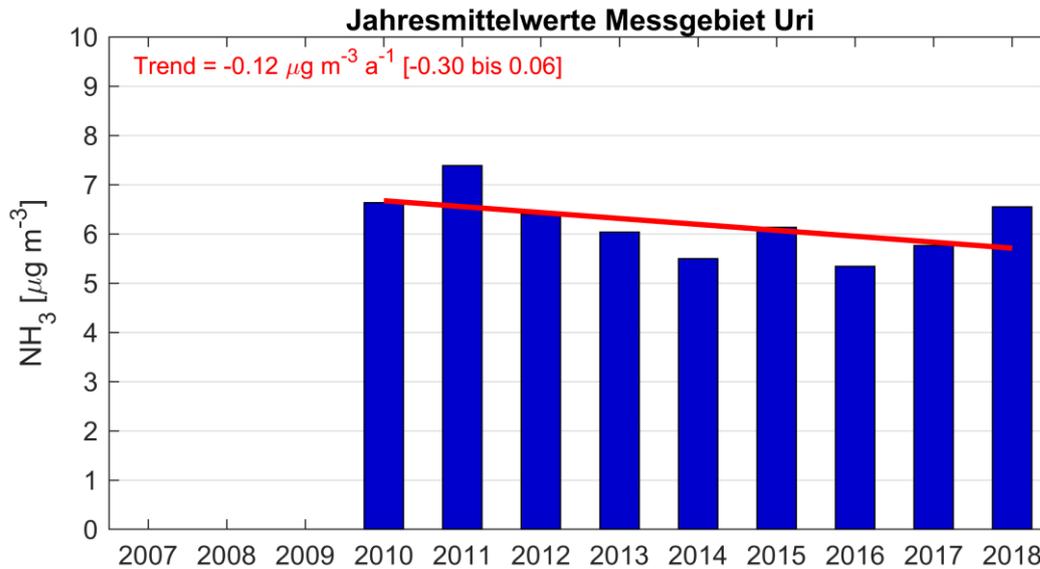


Abbildung 17: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Uri (verwendete Stationen zur Trendberechnung: UR01, UR02, UR03).

3.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkten

In diesem Unterkapitel werden die Jahresmitteltrendberechnungen an vier ausgewählten Messpunkten aufgezeigt. Messpunkt ZB01 tritt als Repräsentant von wenig belasteten Standorten auf.

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

Bei der Berechnung wurde jeweils ein Trend über die gesamte Messperiode am jeweiligen Messpunkt («Trend», graue Linie) sowie ein Trend seit 2010 berechnet («Trend_10», rote Linie). Abbildung 18 bis Abbildung 21 zeigen die Trendberechnungen für die vier ausgewählten Messpunkte, die Trendberechnung für sämtliche Messpunkte ist im Anhang Kapitel 5.5.2 zu finden.

Generell ist festzustellen, dass an allen Messpunkten ausser WAU14 im Jahre 2018 eine höhere Ammoniakkonzentration gemessen wurde als 2017.

- SCHU00: Seit Messbeginn (2000) statistisch signifikant zunehmende Ammoniakkonzentration (+0.10 µg m⁻³ a⁻¹). Nach einem leichten Rückgang zwischen 2015 und 2017 hat der Messwert im Jahr 2018 sprunghaft zugenommen. Dies ist der höchste an diesem Messpunkt erfasste Wert seit Messbeginn.

- ESC14: Seit Messbeginn (2006) statistisch signifikant zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.47 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). Der neue Wert ist massiv höher als die Vorjahres-Werte und der höchste Wert seit Messbeginn, wie schon im Vorjahr.
- UR02: Seit Messbeginn (2010) statistisch signifikant abnehmende Ammoniakkonzentration ($-0.25 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). Seit 2016 sind jedoch steigende Konzentrationen verzeichnet.
- ZB01: Über beide Zeitperioden ist kein signifikanter Trend feststellbar, wobei aber auch an diesem Messpunkt der neue Wert der höchste seit 2003 ist.

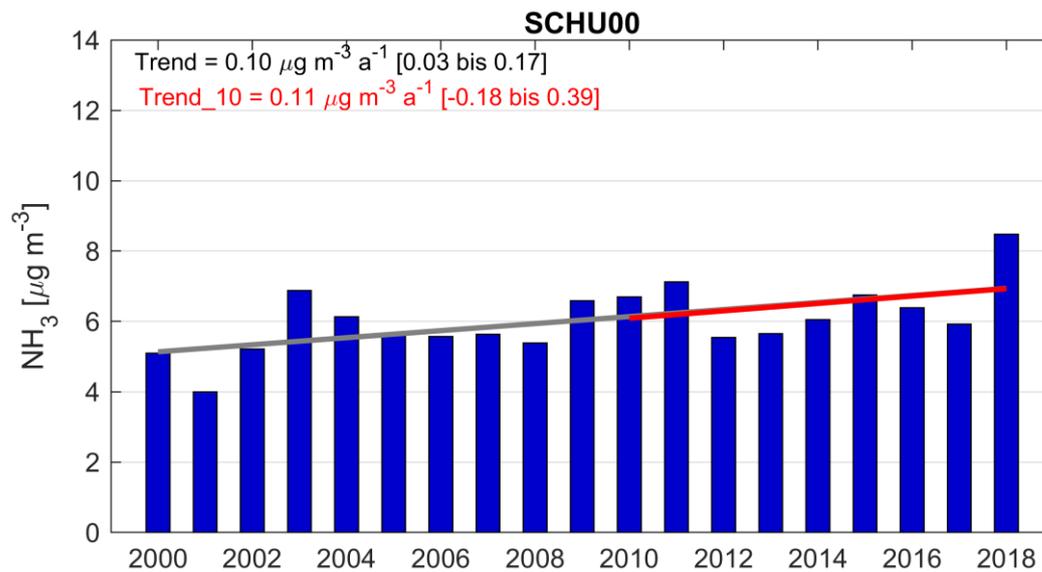


Abbildung 18: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt SCHU00. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

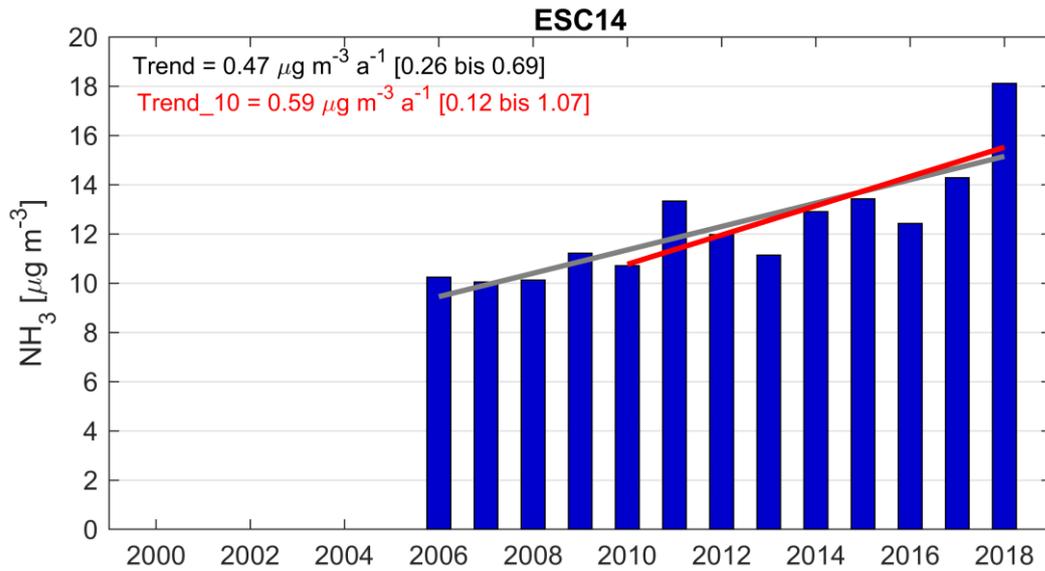


Abbildung 19: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ESC14. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010. Zum besseren Verständnis wurde die y-Achsen-Skala in dieser Abbildung den Messwerten angepasst.

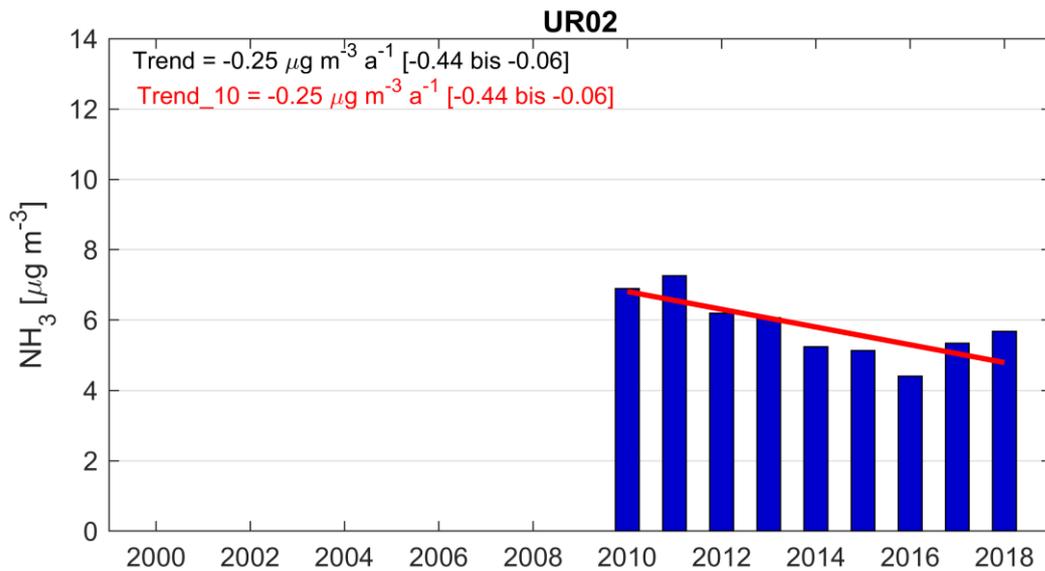


Abbildung 20: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt UR02. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

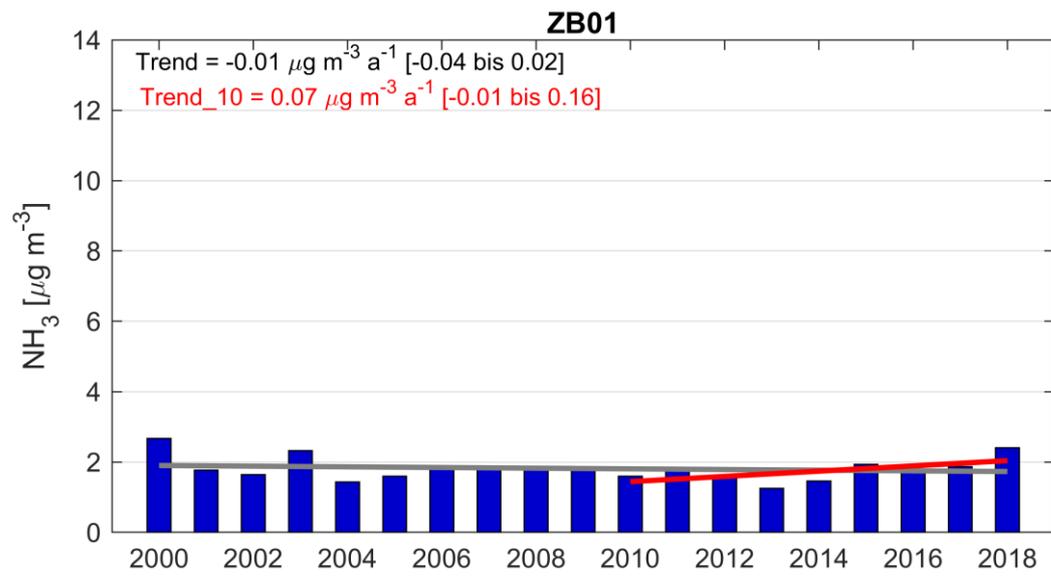


Abbildung 21: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ZB01. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

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 Gesamtstickstoff-Frachten (Deposition). Sie bezeichnen die Grenze für den Eintrag von Stickstoff in empfindliche Ökosysteme, unterhalb welcher bei längerfristigem Eintrag nicht mit schädlichen Auswirkungen auf Struktur und Funktion des Ökosystems gerechnet wird. Die international festgelegten *Critical Loads*²⁸ aus allen Quellen liegen für Waldökosysteme bei 10 bis 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ und für Hochmoore bei 5 bis 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Die Stickstoff-Deposition F [kg N ha⁻¹ a⁻¹] kann somit vereinfacht über die gemessene Ammoniakkonzentration c_{NH₃}, die Expositionsdauer d_{exp} und die Depositionsgeschwindigkeit V_{dep} abgeschätzt werden:

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

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.²⁹ 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 (1) 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.

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

²⁸ UNECE (2007): Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts. ECE/EB.Air/WG.5/2007/3

²⁹ EKL (2005): Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 384, Bern.

Ammoniumnitrat- und Ammoniumsulfat-haltigem Feinstaub verursacht werden, sind nicht berücksichtigt. Diese tragen etwa einen Viertel zur Gesamtfracht von Stickstoff bei.³⁰ Das dort enthaltene Ammonium stammt ursächlich auch von Ammoniak, wird aber deutlich weiträumiger verfrachtet.

Tabelle 2: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak in kg N ha⁻¹ a⁻¹ an fünf verschiedenen Messpunkten sowie den ZUDK-Messgebieten des Ressourcenprogramms. Als Depositionsgeschwindigkeit wurde bei allen Berechnungen V_{dep}=30 mm s⁻¹ für Nadelwald angenommen. Für Moore wäre mit V_{dep}=20 mm s⁻¹ oder mit 33 % tieferen Frachten zu rechnen. Die Critical Loads betragen bis zu 10/15/20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für Hochmoore beziehungsweise Naturwiesen und Waldökosysteme.

Station	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
WAU16.4	42.8	38.5	36.4	50.0	51.2	56.9	48.0	39.8	42.4	46.6	42.4	43.6	53.8
ESC08	67.8	60.0	56.7	58.4	59.0	69.0	55.5	51.1	69.2	67.6	63.3	76.7	89.7
SCHÜ00	43.3	43.8	41.9	51.2	52.0	55.4	43.1	43.9	47.0	52.9	49.6	46.1	65.9
HOL01	44.0	44.1	45.1	50.5	45.2	52.0	44.6	45.2	48.5	48.2	42.3	57.5	64.8
ZB01	14.3	14.5	14.4	14.4	12.4	13.9	12.5	9.7	11.3	14.8	13.7	14.5	18.7
NW	-	-	-	-	52.8	57.5	51.8	47.1	48.6	52.6	47.8	49.9	59.0
OW³¹	-	-	-	-	56.4	64.8	51.5	50.8	47.2	55.4	52.4	51.6	62.0
SZ	-	-	-	-	37.1	55.7	41.2	28.3	29.5	40.9	40.6	32.6	42.4
UR	-	-	-	-	51.6	57.4	49.7	46.9	42.7	47.7	41.5	44.8	50.9
ZG³²	-	-	-	-	62.8	70.6	60.9	49.4	60.7	58.7	50.9	59.8	67.7

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.³⁰

Abbildung 22 zeigt die Werte von Tabelle 2 in Bezug auf das Jahr 2010. Dieses Referenzjahr entspricht somit 100 %. Schwarz eingezeichnet ist ein berechneter Mittelwert 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 Ammoniak-Belastung 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.

³⁰ Seitler et al. (2016): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 105 S.

³¹ Der Standort OW03 wurde aufgehoben und stattdessen OW04 in Betrieb genommen. In die Berechnung fliessen hier nur OW01 und OW02 ein, die Berechnung wurde auch auf die vorherigen Jahre angepasst.

³² Aufgrund von Vandalismus ab Ende 2013 am Standort ZG01 fliessen nur die Daten von ZG02 und ZG03 in die Berechnung ein. Die Berechnung wurde auch auf die vorherigen Jahre angepasst.

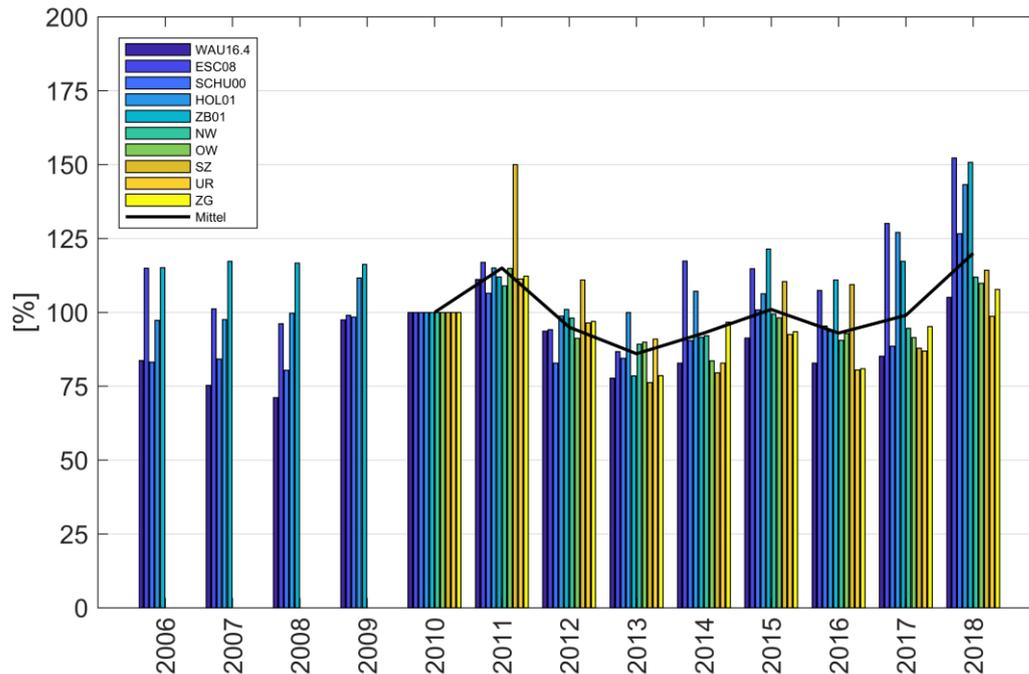


Abbildung 22: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak an fünf Messpunkten und in den fünf Ressourcenprojekt-Messgebieten Zentralschweiz in Bezug auf das Jahr 2010 (2010 = 100 %) sowie das Mittel der ausgewählten Messpunkte und -gebiete seit 2010 (schwarze Linie).

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 im Kapitel 5.6 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 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. 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 Depositionen (Zahlen rechts der Abbildung 23) steigen im Vergleich zum letztjährigen Bericht. Dies zeigt nochmals, dass im Jahr 2018 deutlich höhere Ammoniakkonzentrationen gemessen wurden.

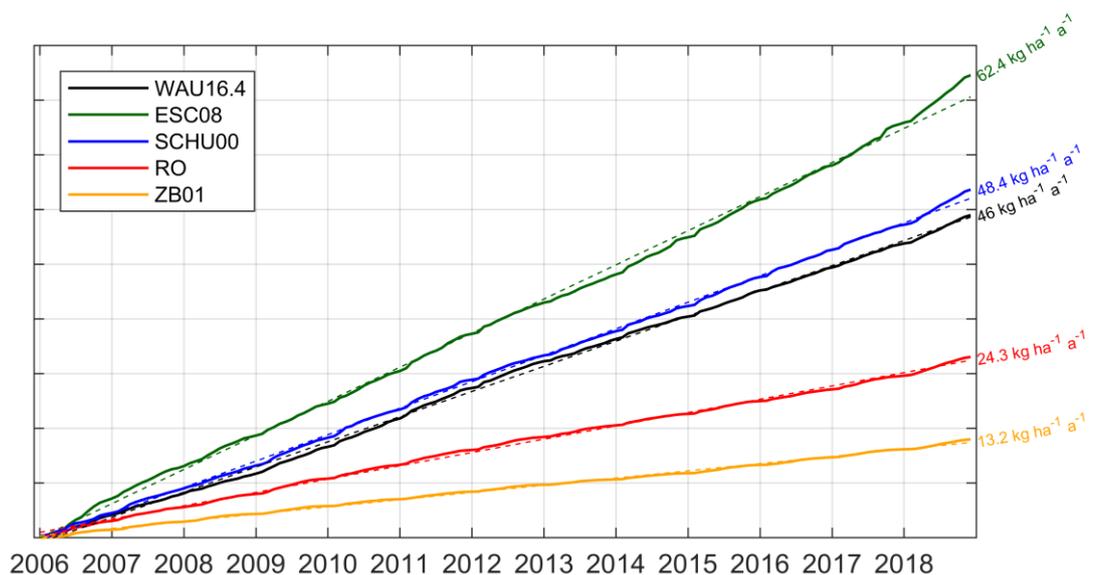


Abbildung 23: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Depositionen seit Januar 2006 bis Dezember 2018 an fünf verschiedenen Messpunkten in der Zentralschweiz. Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion, die Zahlen am rechten Bildrand stehen für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

Abbildung 24 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 die bereits in Abbildung 23 beobachteten nach oben gerichteten Knick teilweise zu sehen. Sie sind aber zu schwach ausgeprägt, als dass sich die berechneten mittleren Depositionen ändern würden.

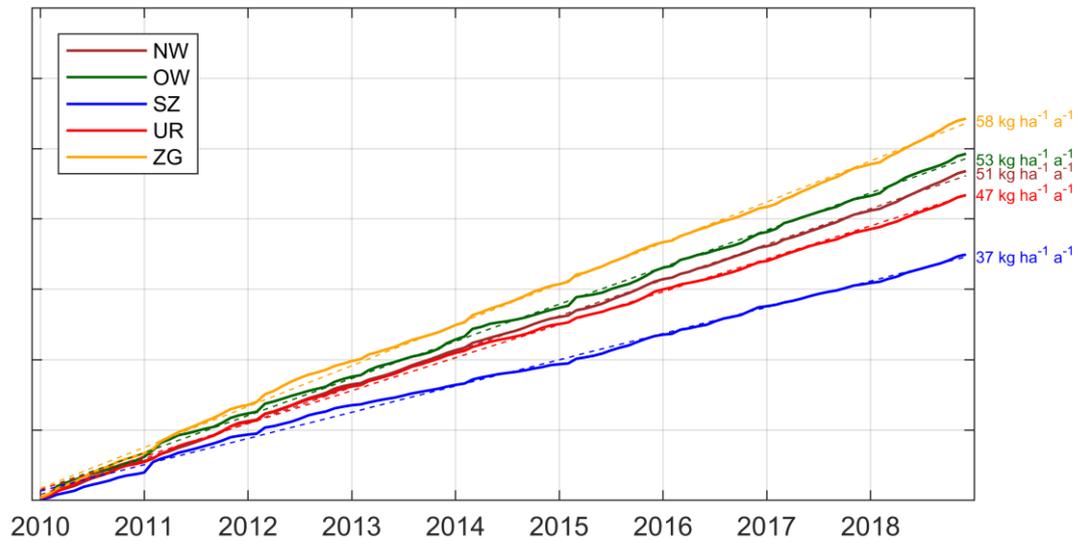


Abbildung 24: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Deposition aller Ressourcenprojekt-Standorte der ZUDK (Ressourcenprojekt-Messpunkte seit 2010). Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion. Die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittleren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

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)³³ 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 spielen auch die Witterungsverhältnisse im Jahr 2018 eine wichtige Rolle: Das meteorologische Extremjahr 2018 war schweizweit einerseits geprägt von hohen Temperaturen, andererseits aber auch von fehlenden Niederschlägen während der warmen Jahreszeit.³⁴ Die mittlere Jahrestemperatur betrug 6.9 °C und lag somit +1.5 °C über dem Normwert der Periode von 1981-2010. Dies ist ein neuer Rekord seit Messbeginn im Jahre 1864. Betrachtet man nur das Sommerhalbjahr, betrug dieser Überschuss sogar +2.4 °C.³⁵ Der Februar jedoch zeichnet sich durch einen Kälteeinbruch aus.³⁴ Die Jahresniederschläge 2018 erreichten je nach Region 80-95 % der Norm 1981-2010 (Abbildung 25). Dabei ist weiter zu vermerken, dass es Anfang des Jahres im Zusammenhang mit den Winterstürmen zu teilweise heftigen Niederschlagsereignissen kam, der Sommer dann aber gekennzeichnet war durch eine ausgeprägte Regenarmut.³⁴

Diese meteorologischen Umstände machen sich in den Messungen 2018 bemerkbar, die allgemein sehr hoch ausfallen. Auffallend ist, dass zwischen den zwei normalerweise sichtbaren Peaks im Herbst und Frühling die Konzentrationen hoch bleiben und an mehreren Stationen weitere Peaks während der Sommermonate gemessen wurden. Die sommerliche Hitze zusammen mit der aussergewöhnlichen Trockenheit hat dazu beigetragen, dass erstens mehr Ammoniak in die Luft entwich und zweitens dort verweilen konnte.

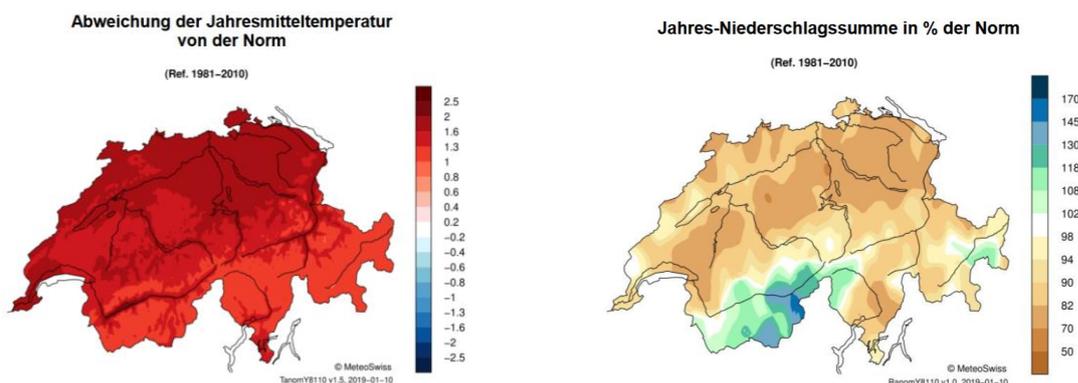


Abbildung 25: Links: Abweichung der Jahresmitteltemperatur 2018 von der Norm in °C (1981-2010). Rechts: Jahres-Niederschlagssumme in Prozent der Norm (1981-2010).³⁵Fehler! Textmarke nicht definiert.

³³ Philipp, M., & Locher, R. (2010). Trendanalyse NH₃-Immissionsmessungen in der Schweiz (S. 38). Winterthur: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.

³⁴ Wey, H. & Ruckstuhl, Ch. (2019). Immissionsmessungen Kanton Uri. Kapitel 9: Das meteorologische Extremjahr 2018 im Kanton Uri. inNET AG, Altdorf.

³⁵ MeteoSchweiz (2019). Klimabulletin 2018. https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/2018_ANN_d.pdf

4 Diskussion

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz 2018 fallen allgemein durch hohe Werte auf. Allerdings ist in den letzten Jahren eine Veränderung des jährlichen Konzentrationsmusters erkennbar. Die typischen Peaks im Herbst und Frühling sind dabei weniger auffällig, wenn auch nicht unbedingt überall weniger hoch, als in früheren Jahren. Dort, wo diese extremen Frühlingsausschläge vermindert sind, haben die eingeführten Massnahmen zur Verminderung der Ammoniakemissionen zu diesem Zeitpunkt wohl gegriffen. In anderen Gebieten jedoch sind vor allem in den letzten drei Jahren zwischen den typischen Peaks im März und Oktober während der Sommermonate weitere Peaks erkennbar oder die Konzentrationen bleiben auf einem hohen Niveau. Vor allem in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten sind zum Teil grosse und sprunghafte Zunahmen zu verzeichnen. Negative Trends aus den letzten Jahren werden durch die neusten Ergebnisse 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 von Thöni et al. (2019).³⁶ Die AutorInnen bemerken, dass «an vielen Standorten die Jahresmittelwerte 2018 zu den höchsten seit Messbeginn 2000 gehörten». Ein Grund dafür ist unter anderem das heisse, trockene Sommerwetter.

Die Jahre 2003 und 2011 waren einerseits ähnlich heiss wie 2018, andererseits zeigen sie ebenfalls schweizweit gesehen einen Ammoniakpeak (Abbildung 2), der die Werte von 2018 aber nicht erreicht. Das letzte Jahr zeichnet sich zusätzlich zu der Hitze durch einen regenarmen Sommer aus, der nur mit den Jahren 2015, 1983 und 1984 vergleichbar ist.³⁷ Durch diese meteorologischen Verhältnisse entwick 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.^{38,39,40} Diese Massnahme wird aber zum Beispiel im «Massnahmenplan Ammoniak» vom Kanton Zug nicht gesondert aufgeführt, weil sie nicht geprüft werden kann.⁴¹ 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

³⁶ Thoeni, L., Seitler, E., Meier, M., & Kosonen, Z. (2019). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2018. FUB – Forschungsstelle

³⁷ MeteoSchweiz (2019). Klimabulletin 2018. https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/2018_ANN_d.pdf

³⁸ Agridea (2011). Ammoniakverluste aus der Landwirtschaft. Merkblatt.

³⁹ Richner W. & Sinaj S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.

⁴⁰ Wey, H., Ruckstuhl, Ch. (2019): Übersicht über die Immissionsmessungen im Kanton Uri mit Fokus auf das Jahr 2018. Zusatzkapitel 9: Das meteorologische Extremjahr 2018 im Kanton Uri. inNET AG.

⁴¹ Amt für Umwelt Kanton Zug (2016). Massnahmenplan Ammoniak 2016 - 2030 Kanton Zug. <https://www.zg.ch/behoerden/baudirektion/amt-fuer-umwelt/landwirtschaft/luftreinhaltung-in-der-landwirtschaft/massnahmenplan-ammoniak>

zur Effizienz von Güllegaben in Abhängigkeit der Lufttemperatur.^{42,43,44} Dieser Zusammenhang sollte besser untersucht werden, um den Landwirten faktenbasierte Empfehlungen geben zu können.

Bezüglich der Messungen ist es dringend notwendig, diese an möglichst vielen Standorten über mehrere Jahre weiterzuführen. Viele Messungen zeigen gleichbleibende oder positive Trends auf. Das Ziel 2017 (Abbildung 1), die Ammoniakemissionen auf nationalem Level im Vergleich zu 2010 um etwa 25 % zu senken, wurde nicht erreicht. Die von der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL) als Zielgrössen empfohlenen Critical Loads und Critical Level in den vorliegenden Messungen regelmässig und teilweise stark überschritten. Wichtig ist, dass das Monitoring nicht nur an exponierten landwirtschaftlichen Standorten erfolgt, sondern auch ökologisch sensitive Standorte untersucht werden. Um eine wirkliche Abnahme in den Ammoniakemissionen 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.⁴⁵

⁴² Hersener, 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.

⁴³ Cormann, M. (unpublished, 2019). Application of 15N labelled slurry in a microplot field study: Ammonia volatilization and N dynamics in plant and soil N pools (S. 65).

⁴⁴ Häni, Ch., Sintermann, J., Kupper, Th., Jocher, M., & Neftel, A. (2016). Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 125, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.069>

⁴⁵ Philipp, M., & Locher, R. (2010). Trendanalyse NH₃-Immissionsmessungen in der Schweiz (S. 38). Winterthur: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.

5 Anhang

5.1 Detaillierte Standortbeschreibungen

5.1.1 Wauwil, Luzern

Im Messgebiet Wauwil (Abbildung 26) wurde schon im Jahr 2000 mit Ammoniakmessungen begonnen. In den weiteren Jahren kamen Nord-Süd- und Ost-West-Transekte hinzu, um die lokal-räumliche Verteilung der Ammoniakkonzentration zu durchleuchten. Zusätzlich wurden rund um das Naturschutzgebiet Wauwiler Moos Ammoniakmessungen durchgeführt.

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



Abbildung 26: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Wauwil. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche im Jahr 2018 in Betrieb sind.

5.1.2 Eschenbach, Luzern

Im Messgebiet Eschenbach (Abbildung 27) startete die Ammoniakmessung an diversen Standorten im Jahr 2004. Zum jetzigen Zeitpunkt sind noch fünf Messpunkte in Betrieb. 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.



Abbildung 27: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Eschenbach. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche im Jahr 2018 in Betrieb sind.

5.1.3 Neudorf, Luzern

An den drei Messpunkten im Gebiet Neudorf (Abbildung 7) 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.



Abbildung 28: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Neudorf. Alle Messpunkte sind im Jahr 2018 in Betrieb.

5.1.4 Schüpheim, Luzern

Das Messgebiet Schüpheim besteht heute aus drei Messpunkten (Abbildung 29). 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.

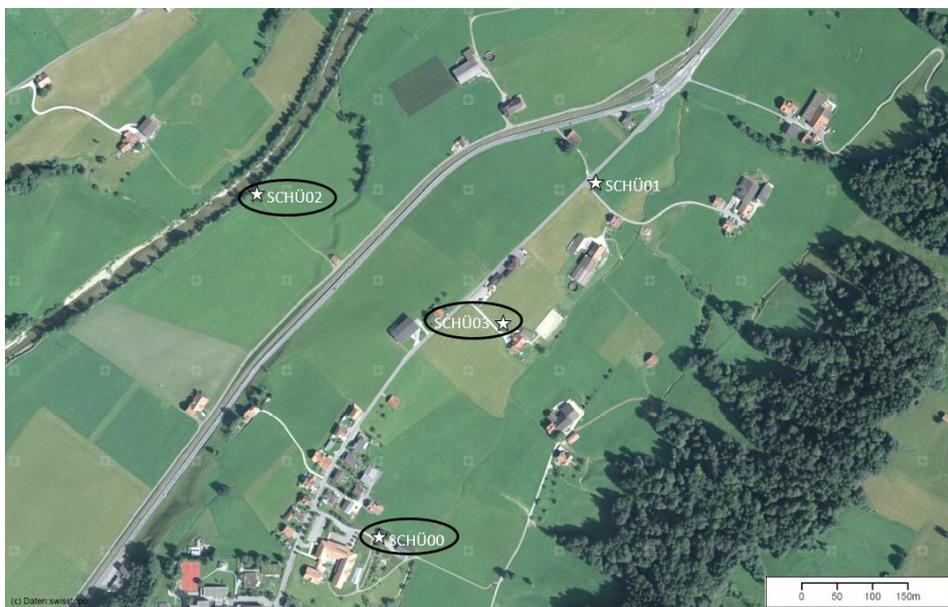


Abbildung 29: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Schüpheim. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche im Jahr 2018 in Betrieb sind.

5.1.5 Holderhus, Luzern

Im Jahr 2000 starteten die Ammoniakmessungen im Gebiet Holderhus (Abbildung 30). 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.



Abbildung 30: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Holderhus. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche seit 2016 in Betrieb sind.

5.1.6 Root Michaelskreuz, Luzern

Im Messgebiet Root Michaelskreuz wird die Ammoniakkonzentration seit 2011 an einem Messpunkt erfasst (Abbildung 31). 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.



Abbildung 31: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Root Michaelskreuz.

5.1.7 Nidwalden

Im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz wurden im Kanton Nidwalden drei Messpunkte installiert. Die Messungen starteten im Jahr 2010 (Abbildung 32). 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.



Abbildung 32: Räumliche Übersicht im Messgebiet Nidwalden.

5.1.8 Obwalden

Im Kanton Obwalden wurden im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz drei Messpunkte installiert (Abbildung 33). 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.



Abbildung 33: Räumliche Übersicht im Messgebiet Obwalden.

5.1.9 Schwyz

Im Talkessel von Schwyz in der Nähe von Ibach liegen die drei Ammoniak-Messpunkte des Kantons Schwyz (Abbildung 34). Diese drei Messpunkte wurden ebenfalls im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz installiert. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt.



Abbildung 34: Räumliche Übersicht im Messgebiet Schwyz

Zusätzlich wird im Kanton Schwyz seit 2014 in Wangen die Ammoniakkonzentration gemessen. Der Messpunkt liegt in der Linthebene zwischen Wangen und Lachen und wurde aufgrund der Flechtenkartierung 2013⁴⁶ so gewählt.



Abbildung 35: Messpunkt WAN01 und räumliche Übersicht im Messgebiet Wangen.

⁴⁶ puls (2014): Flechten und Luftqualität in Ausserschwyz Ost: Wirkungskontrolle 2013. Amt für Umweltschutz Kanton Schwyz. 50 S.

5.1.10 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.



Abbildung 36: Räumliche Übersicht im Messgebiet Uri.

5.1.11 Zug

Neben fünf kantonalen Messstationen hat der Kanton Zug im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz zusätzlich drei Messpunkte installiert (Abbildung 37). Diese liegen im Gebiet um Niederwil (Gemeinde Cham). Die Flächen um die Messpunkte werden acker- wie auch futterbaulich genutzt. Die Topographie ist leicht hügelig, offen und gut durchlüftet.



Abbildung 37: Räumliche Übersicht im Messgebiet Niederwil (Cham) inkl. kantonalen Messpunkt Kloster Frauental.

Die fünf kantonalen Messgebiete mit je einem Messpunkt verteilen sich über das gesamte Kantonsgebiet, wobei die Station Zugerberg 1 durch das IAP betrieben wird (Abbildung 38). Bei der Auswahl der kantonalen Messgebiete interessierte vor allem, wie die Ammoniakbelastung in sensiblen Ökosystemen, für die sowohl *Critical Loads* als auch *Critical Levels* definiert worden sind, aussieht (Messgebiete Zigerhüttli, Frübüel und Frauental). Zusätzlich wurde ein typischer Agglomerations-Hintergrundstandort gewählt, um den Einfluss von Strassen und der Stadtnähe zu bestimmen (Messgebiet Inwil).

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

- 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.



Abbildung 38: Räumliche Übersicht der kantonalen Passivsammler von Zug sowie der Passivsammler des „Ressourcenprojekts Ammoniak“.

5.1.12 Rigi-Seebodenalp (NABEL)

Bei der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp befindet sich ebenfalls eine Ammoniak-Messstation. Der Messpunkt befindet sich auf der Kante der Mülmannsegg, 600 m über dem Vierwaldstättersee auf gut 1'000 m ü. M. (Abbildung 39).



Abbildung 39: Räumliche Übersicht im Gebiet der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp.

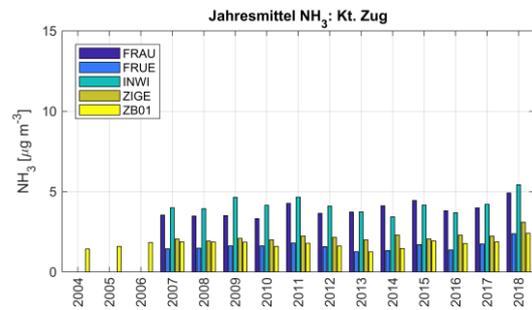
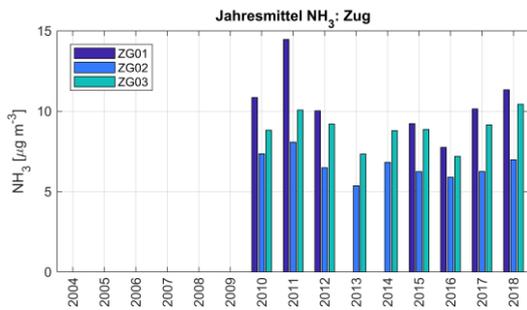
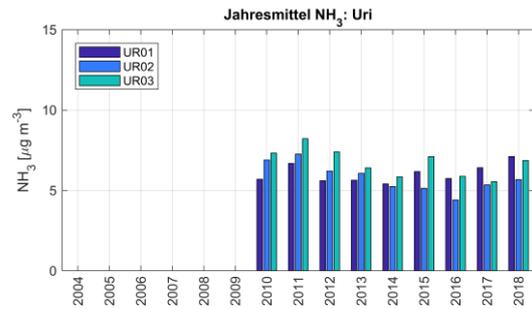
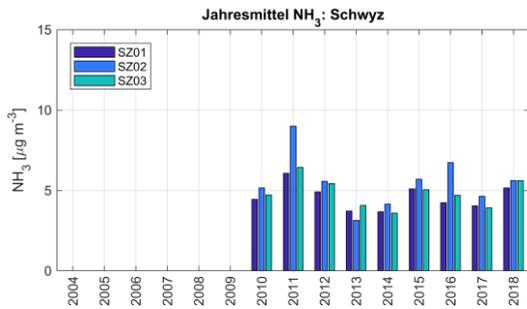
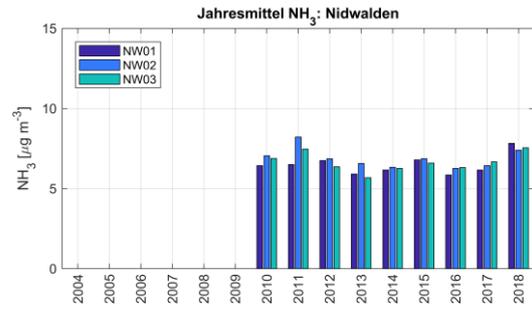
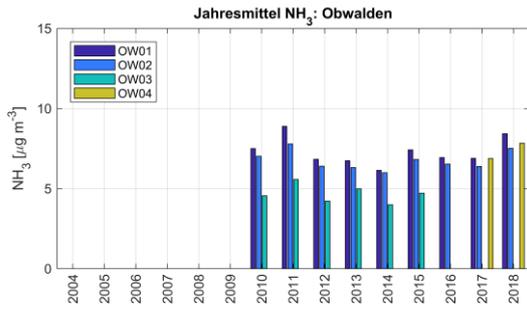
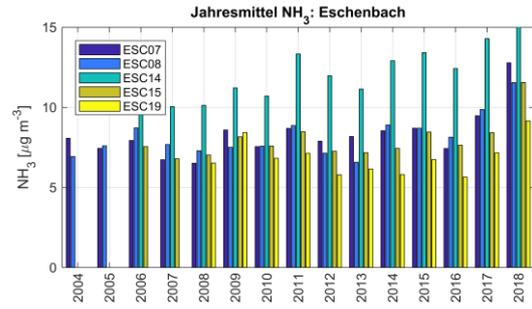
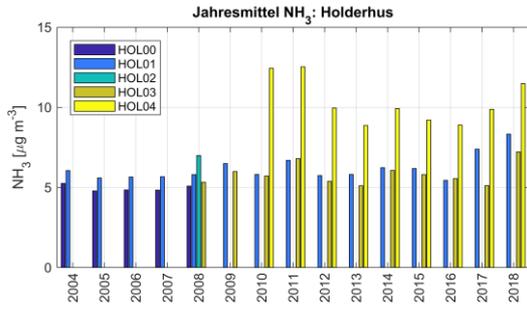
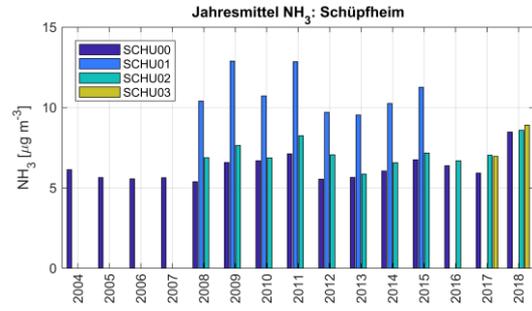
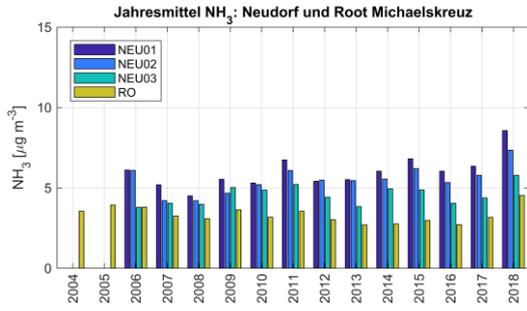
5.2 Charakterisierung der Messpunkte

Tabelle 3: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte

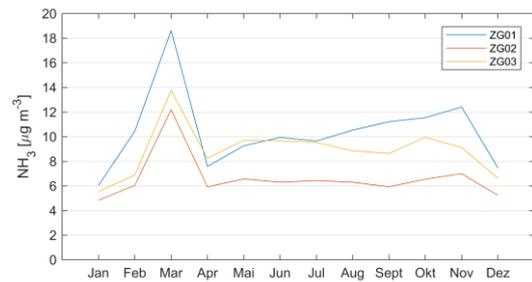
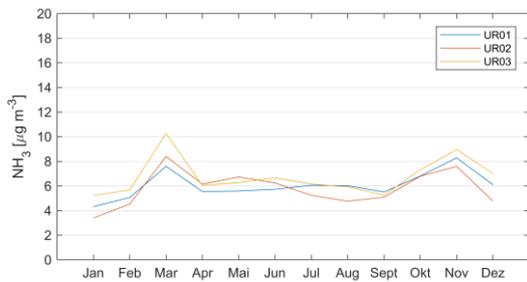
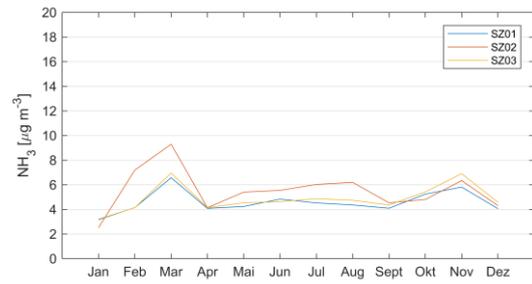
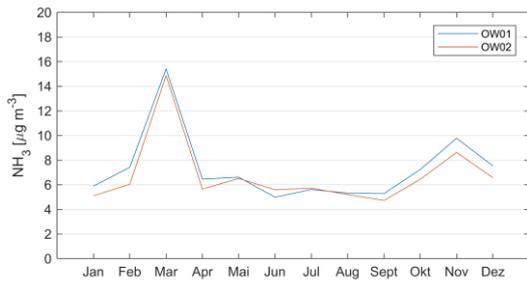
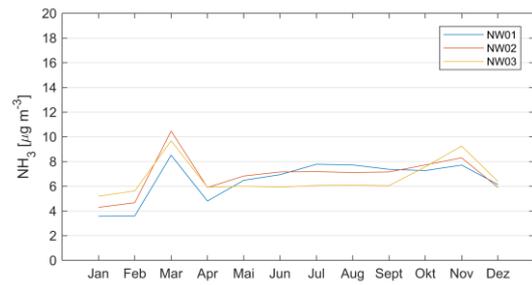
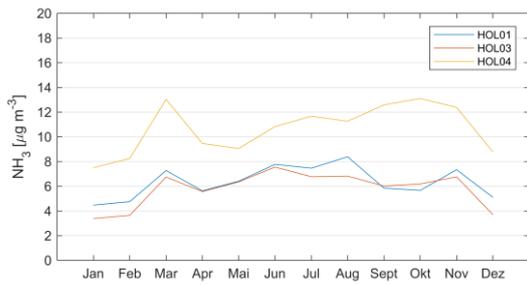
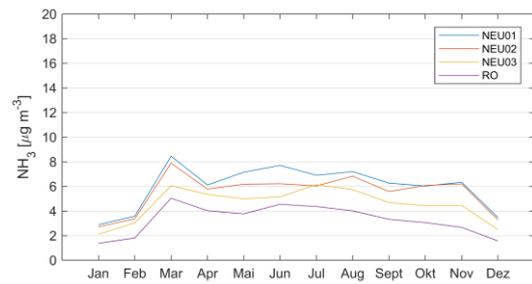
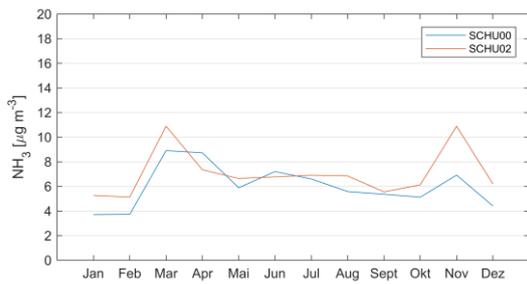
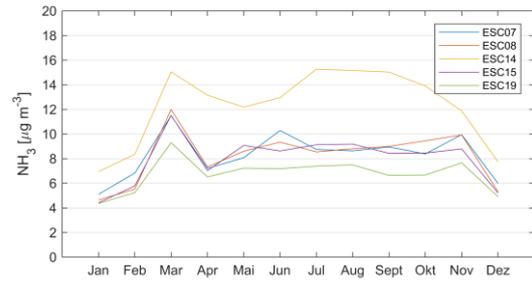
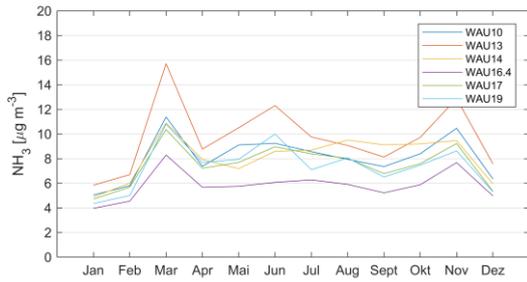
Standort- abkürzung	Standort	Messnetz	E-Koord.	N-Koord.	Jahresmittel 2011 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2012 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2013 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2014 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2015 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2016 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2017 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Jahresmittel 2018 [$\mu\text{g m}^{-3}$]
WAU10	Wauwil 10	Luzern	644735	224950	9.2	8.4	7.4	7.3	8.8	7.6	8.4	9.4
WAU13	Wauwil 13	Luzern	644669	224165	10.9	10.2	9.1	9.0	9.9	9.5	9.8	10.9
WAU14	Wauwil 14	Luzern	643364	224124	9.9	8.9	7.4	7.6	9.5	8.4	8.8	8.1
WAU16.2	Wauwil 16.2	Luzern	643707	224651	6.7	5.7	4.5	4.8	5.3	4.8	5.1	6.2
WAU16.4	Wauwil 16.4	Luzern	643707	224651	7.3	6.2	5.1	5.5	6.0	5.5	5.6	6.9
WAU17	Wauwil 17	Luzern	643451	225590	8.9	7.8	7.1	6.5	7.3	6.7	7.3	8.6
WAU19	Wauwil 19	Luzern	644113	224324	8.6	7.2	6.2	7.1	8.0	8.0	7.1	8.2
NEU01	Neudorf 1	Luzern	659290	224550	6.7	5.4	5.5	6.0	6.8	6.0	6.4	8.6
NEU02	Neudorf 2	Luzern	659706	224499	6.1	5.5	5.5	5.6	6.2	5.9	5.8	7.4
NEU03	Neudorf 3	Luzern	660470	224246	5.2	4.4	3.8	5.0	4.9	4.0	4.4	5.8
SCHÜ00	Schüpfheim 0	Luzern	644727	201091	7.1	5.5	5.7	6.1	6.8	6.4	5.9	8.5
SCHÜ01	Schüpfheim 1	Luzern	645021	201587	12.9	9.7	9.5	10.3	11.3	-	-	-
SCHÜ02	Schüpfheim 2	Luzern	644537	201575	8.3	7.1	5.9	6.6	7.2	6.7	7.0	8.6
SCHÜ03	Schüpfheim 3	Luzern	644883	201384	-	-	-	-	-	-	7.0	8.9
HOL01	Holderhus 1	Luzern	657129	216962	6.7	5.7	5.8	6.2	6.2	5.4	7.4	8.3
HOL03	Holderhus 3	Luzern	657229	216724	6.8	5.4	5.1	6.1	5.8	5.6	5.1	7.2
HOL04	Holderhus 4	Luzern	657256	216902	12.5	10.0	8.9	9.9	9.2	8.9	9.9	11.5
RO	Root Michaelskreuz	Luzern	673847	218489	3.6	3.0	2.7	2.8	3.0	2.7	3.2	4.5
ESC07	Eschenbach 7	Luzern	665253	221074	8.7	7.9	8.2	8.5	8.7	7.4	9.5	12.8
ESC08	Eschenbach 8	Luzern	665208	221946	8.9	7.1	6.6	8.9	8.7	8.1	9.9	11.5
ESC14	Eschenbach 14	Luzern	663387	220976	13.3	12.0	11.1	12.9	13.4	12.4	14.3	18.1

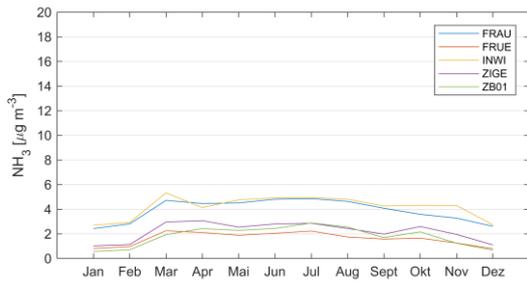
ESC15	Eschenbach 15	Luzern	664039	220788	8.5	7.3	7.2	7.4	8.5	7.7	8.4	11.6x
ESC19	Eschenbach 19	Luzern	664795	221169	7.1	5.8	6.2	5.8	6.7	5.7	7.2	9.2
NW-01	Stans Galgenried Nord	RP A-ZS	669232	202160	6.5	6.8	5.9	6.2	6.8	5.9	6.2	7.8
NW-02	Stans Galgenried Süd	RP A-ZS	669272	201761	8.2	6.9	6.6	6.3	6.9	6.3	6.4	7.4
NW-03	Oberdorf Schiessstand	RP A-ZS	672375	200273	7.5	6.4	5.7	6.3	6.6	6.3	6.7	7.6
OW-01	Obwalden 1	RP A-ZS	664271	195471	8.9	6.8	6.7	6.1	7.4	6.9	6.9	8.4
OW-02	Obwalden 2	RP A-ZS	664518	195592	7.8	6.4	6.3	6.0	6.8	6.5	6.4	7.5
OW-03	Obwalden 3	RP A-ZS	664798	195978	5.6	4.2	5.0	4.0	4.7	-	-	-
OW-04	Obwalden 4	RP A-ZS	664301	196174	-	-	-	-	-	-	6.9	7.8
SZ-01	Bauschli	RP A-ZS	692420	207555	6.1	4.9	3.7	3.7	5.1	4.2	4.0	5.2
SZ-02	Tändlen	RP A-ZS	692890	207272	9.0	5.6	3.1	4.1	5.7	6.7	4.6	5.6
SZ-03	Rossmattli	RP A-ZS	692550	207040	6.4	5.4	4.1	3.6	5.0	4.7	3.9	5.6
UR-01	Uri 1	RP A-ZS	691655	188171	6.7	5.6	5.6	5.4	6.2	5.7	6.4	7.1
UR-02	Uri 2	RP A-ZS	691718	188555	7.3	6.2	6.1	5.2	5.1	4.4	5.3	5.7
UR-03	Uri 3	RP A-ZS	691372	189215	8.2	7.4	6.4	5.8	7.1	5.9	5.5	6.9
ZG-01	Niederwil 1	RP A-ZS	676343	229868	14.5	10.0	-	-	9.2	7.8	10.1	11.3
ZG-02	Niederwil 2	RP A-ZS	676164	229277	8.1	6.5	5.4	6.8	6.2	5.9	6.2	7.0
ZG-03	Niederwil 3	RP A-ZS	675708	229387	10.1	9.2	7.3	8.8	8.9	7.2	9.1	10.4
FRAU	Kloster Frauental	Kt. Zug	674546	229562	4.3	3.7	3.7	4.1	4.4	3.8	4.0	4.9
FRUE	Früebüel	Kt. Zug	683423	218884	1.8	1.6	1.3	1.3	1.7	1.4	1.7	2.4
INWI	Inwil	Kt. Zug	682567	226900	4.7	4.1	3.7	3.4	4.2	3.7	4.2	5.4
ZIGE	Zigerhüttli	Kt. Zug	691689	220849	2.2	2.2	2.0	2.3	2.1	2.3	2.2	3.1
ZB01	Zugerberg 1	Kt. Zug	683000	220500	1.8	1.6	1.3	1.5	1.9	1.8	1.9	2.4
RIG	Rigi Seebodenalp	NABEL	677845	213462	1.5	1.3	1.3	1.3	-	-	-	-
WAN01	Wangen 01	Kt. Schwyz	709749	227700	-	-	-	-	-	8.2	7.6	-

5.3 Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten



5.4 Jahrgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2010 - 2018)





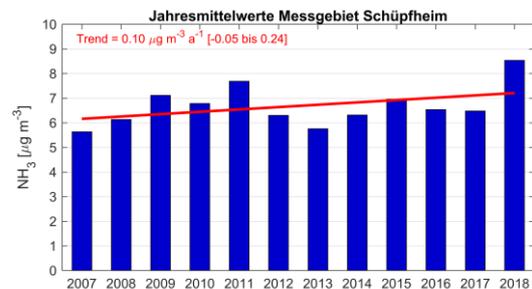
5.5 Trendberechnungen

5.5.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

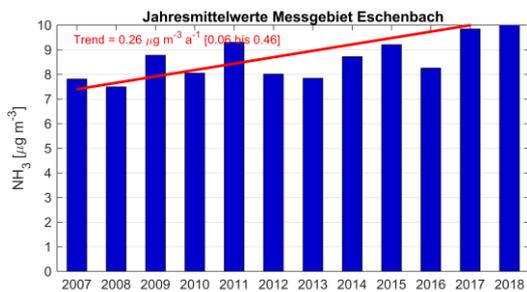
Unter den Grafiken sind jeweils die verwendeten Stationen für die Berechnung des Mittelwerts und der Trendwerte angegeben.



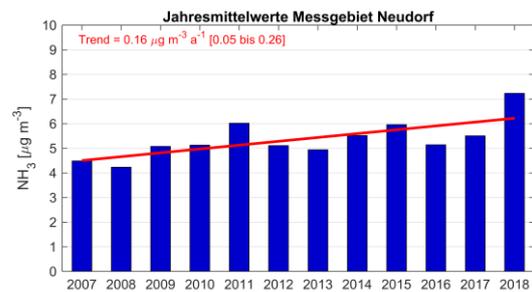
WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4,
WAU17, WAU19



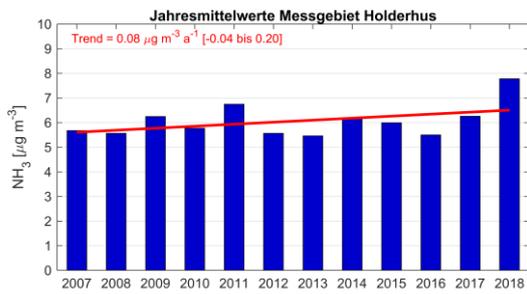
SCHU00, SCHU02



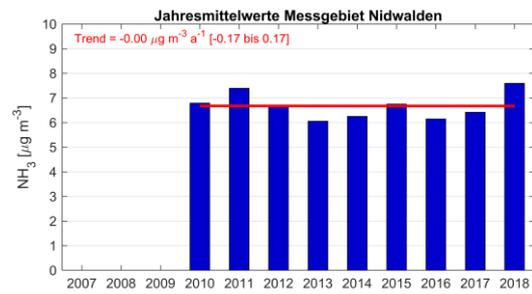
ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19



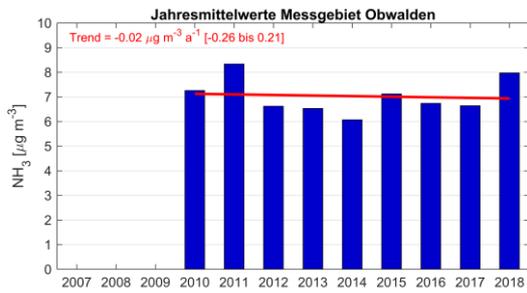
NEU01, NEU02, NEU03



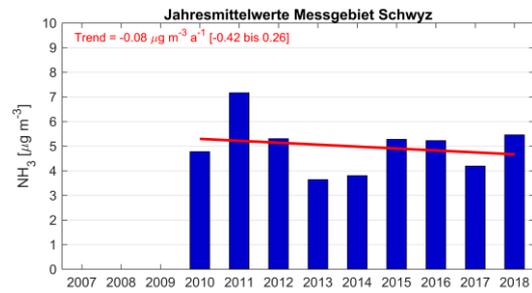
HOL01, HOL03



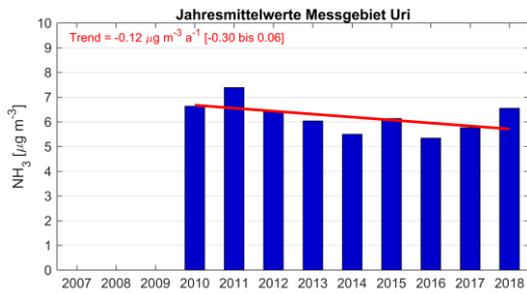
NW01, NW02, NW03



OW01, OW02



SZ01, SZ02, SZ03

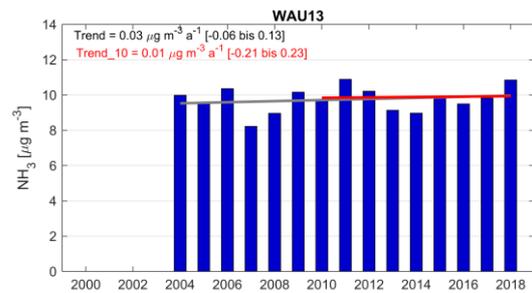
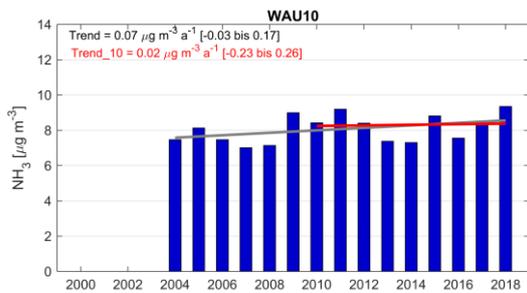


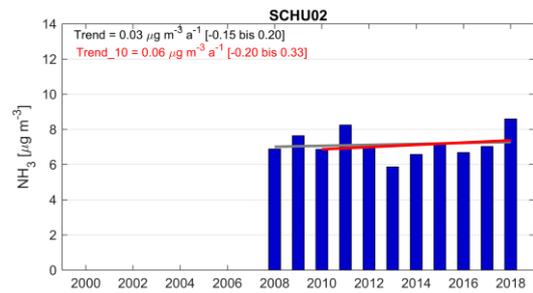
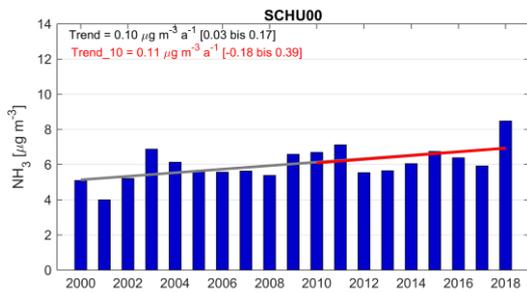
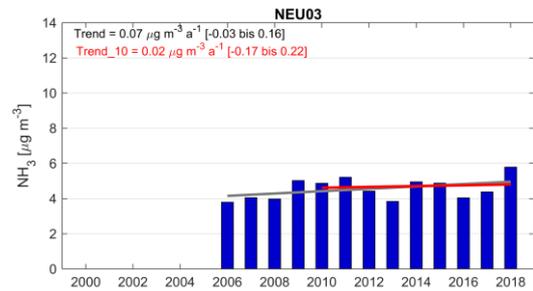
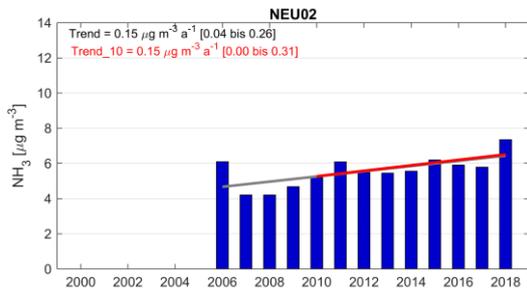
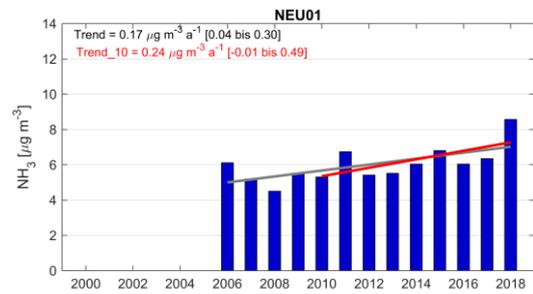
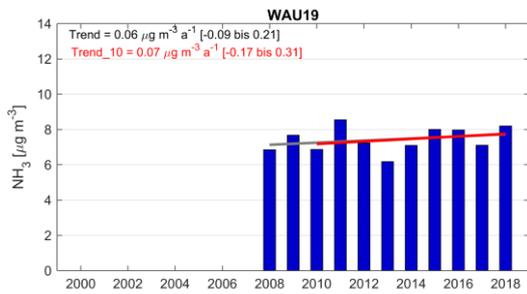
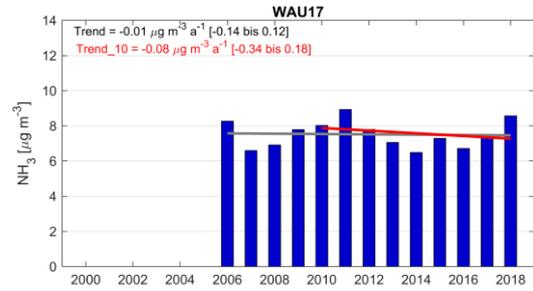
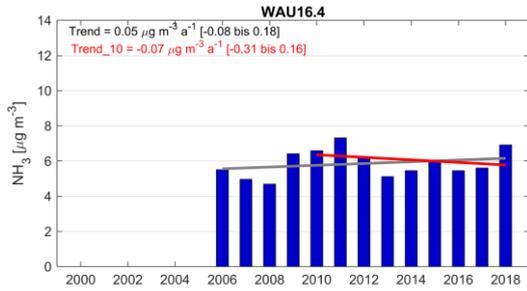
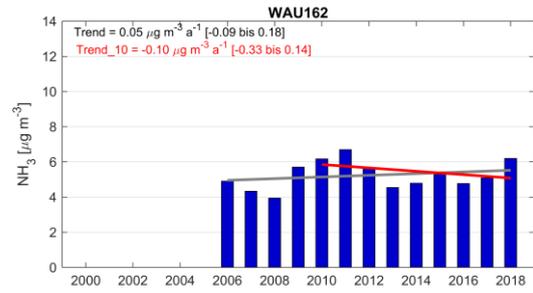
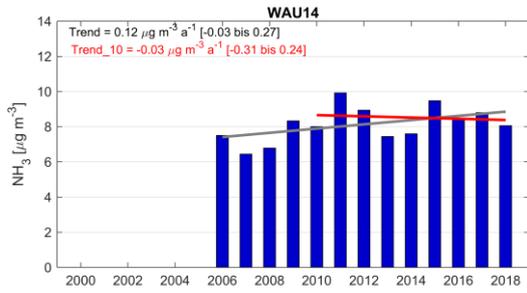
UR01, UR02, UR03

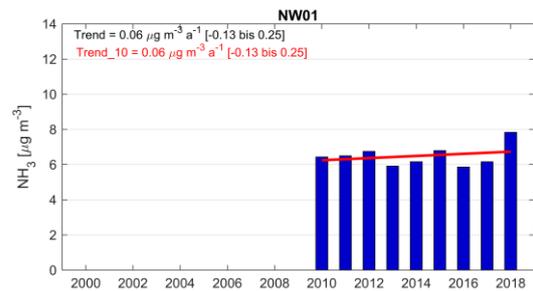
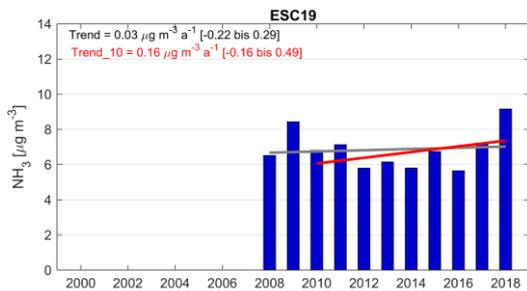
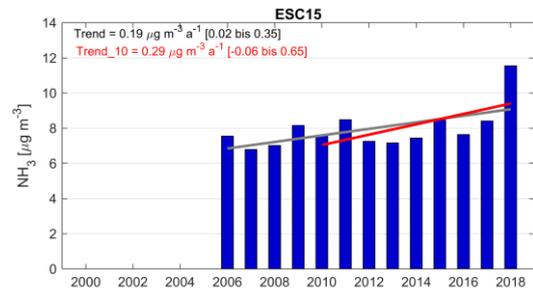
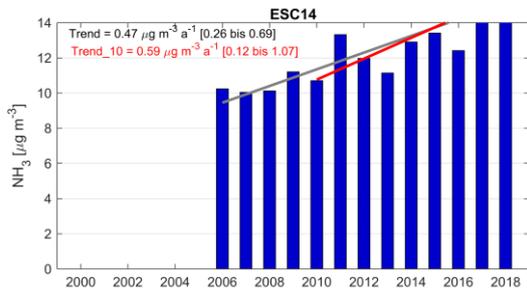
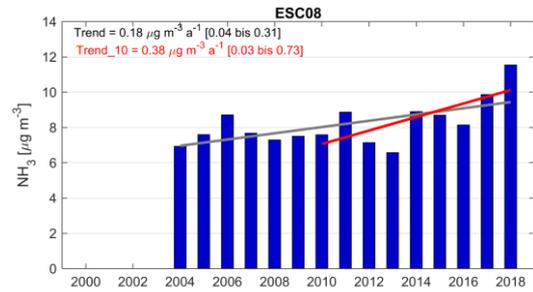
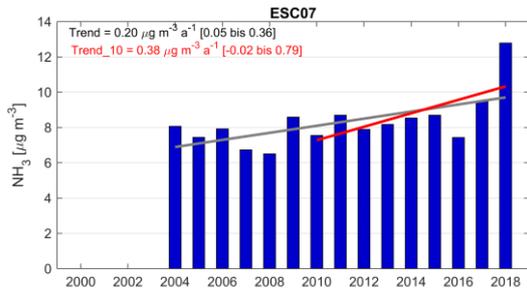
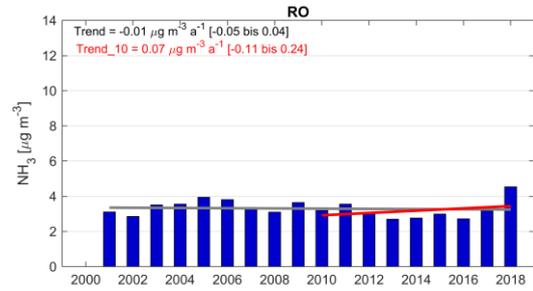
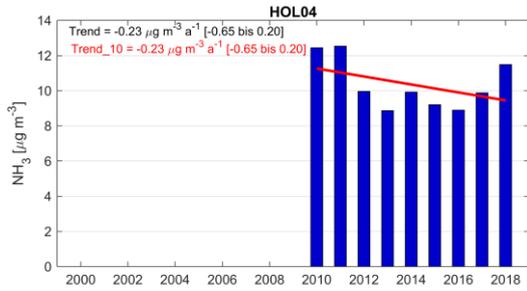
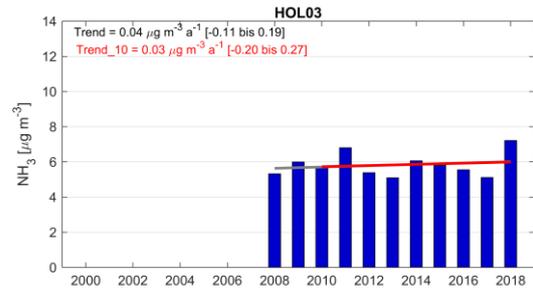
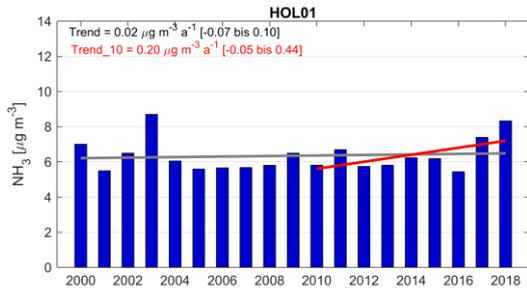


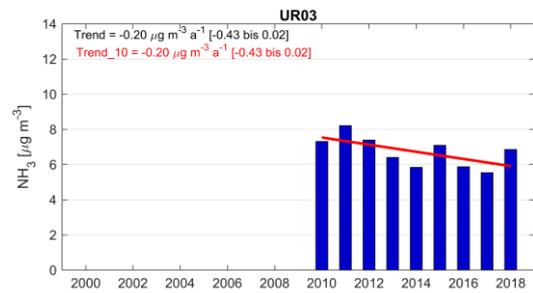
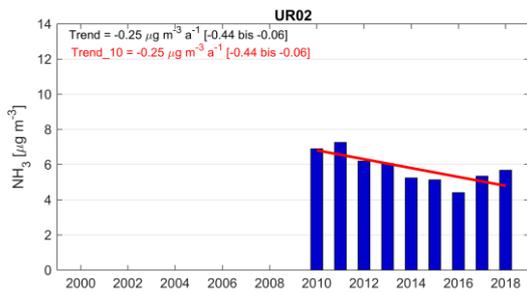
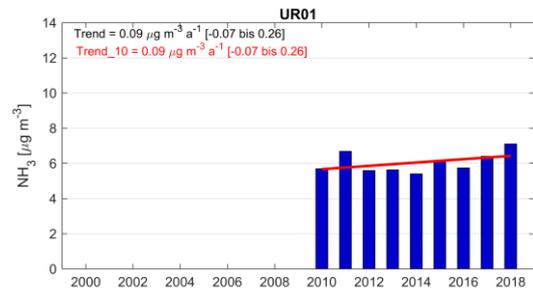
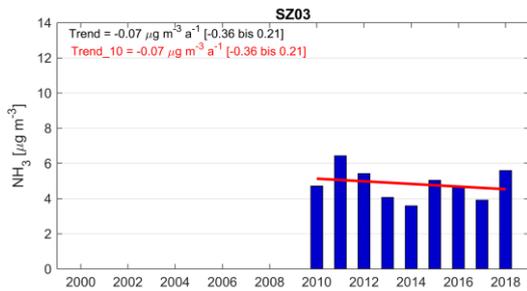
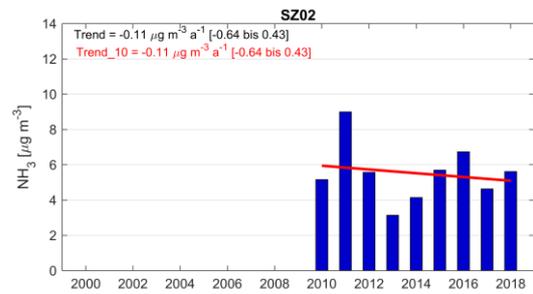
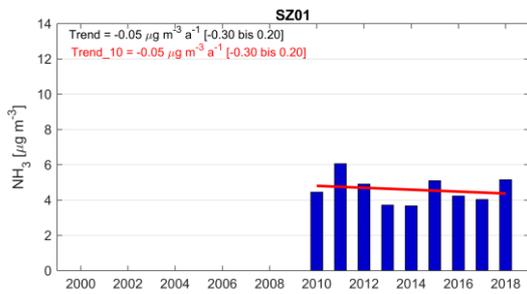
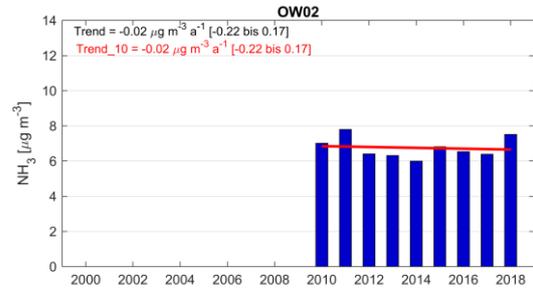
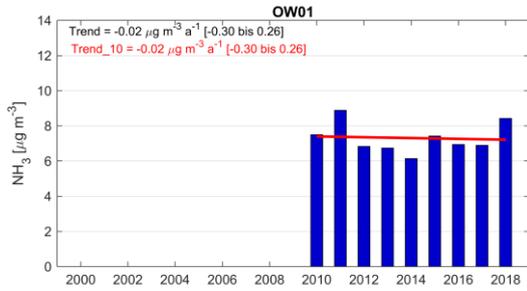
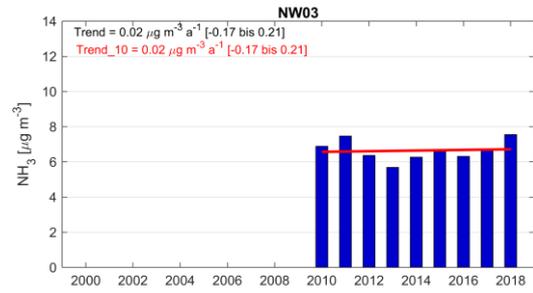
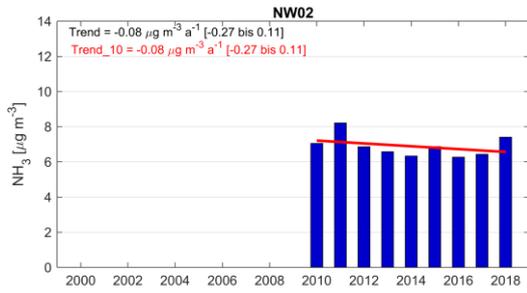
ZG02, ZG03

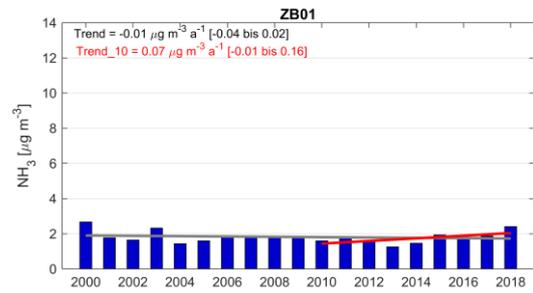
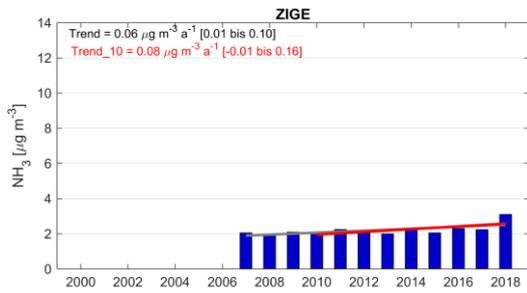
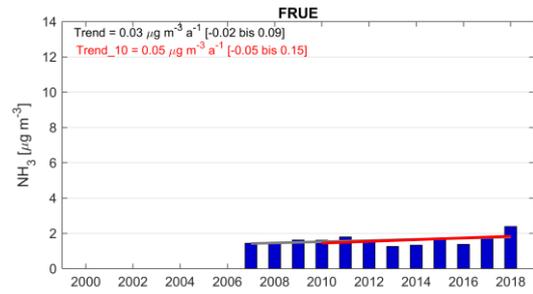
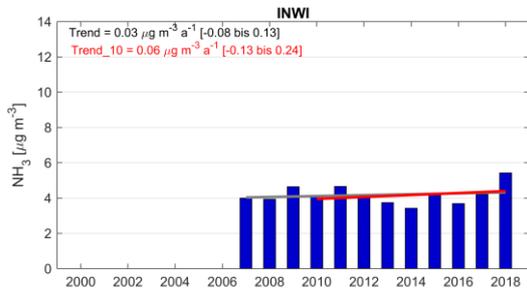
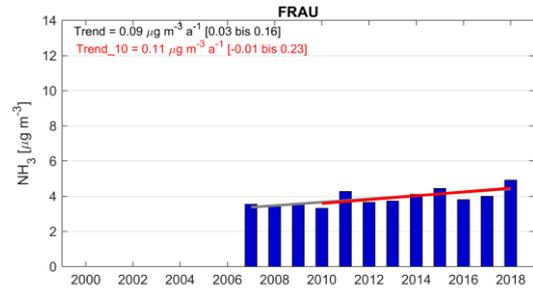
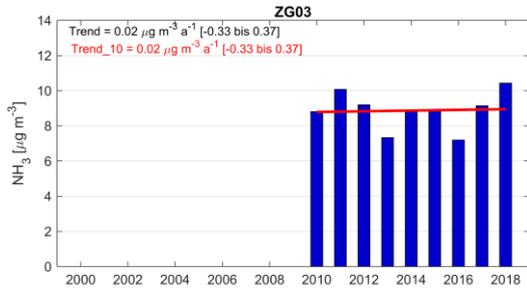
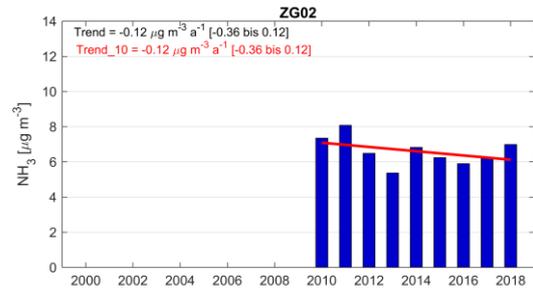
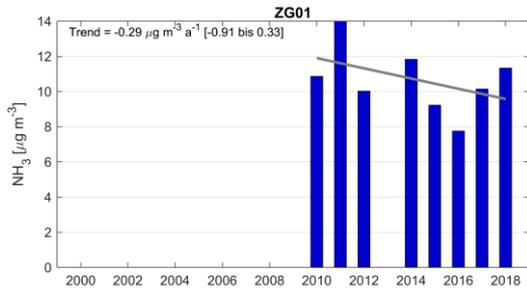
5.5.2 Jahresmittel-Trends nach Standort



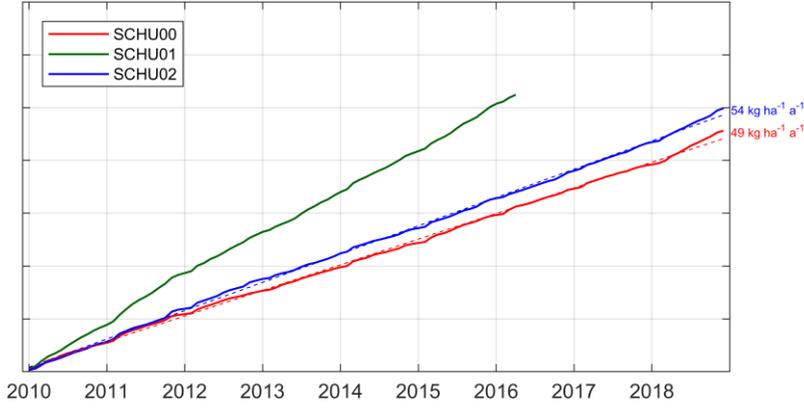
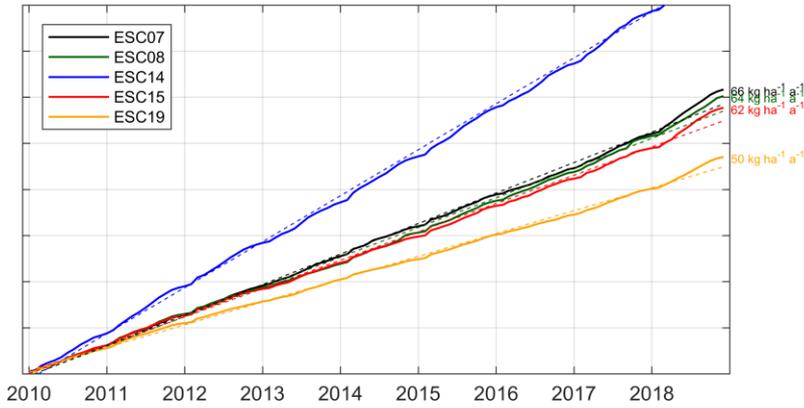
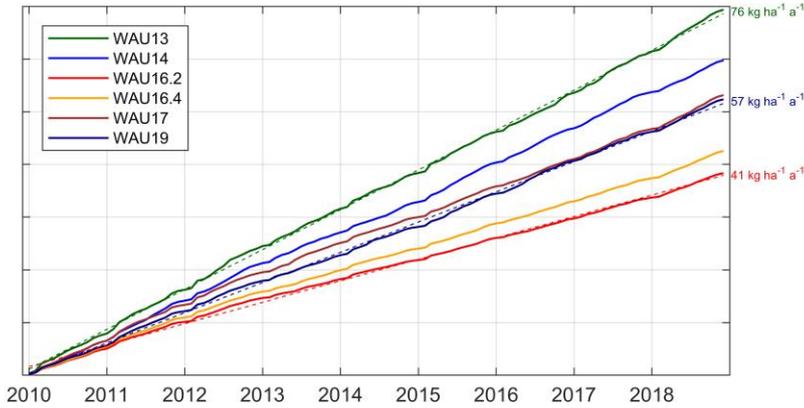


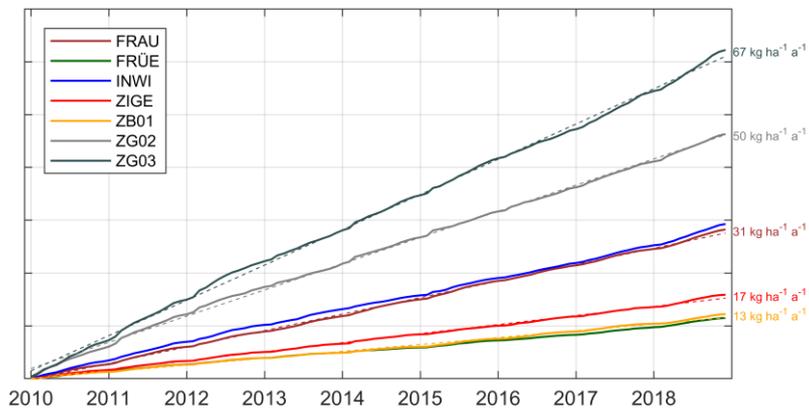
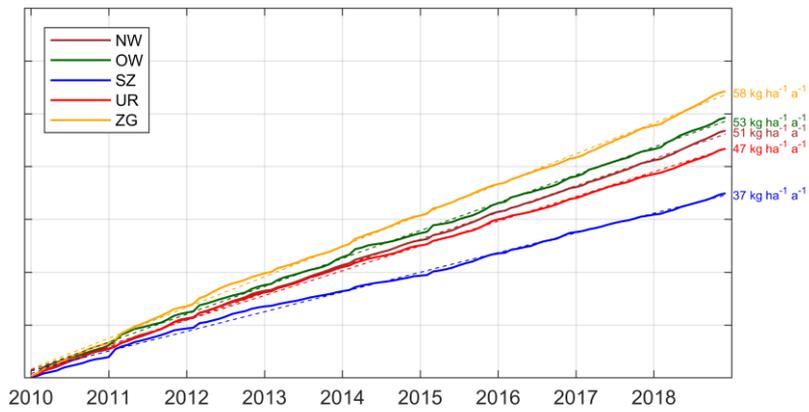
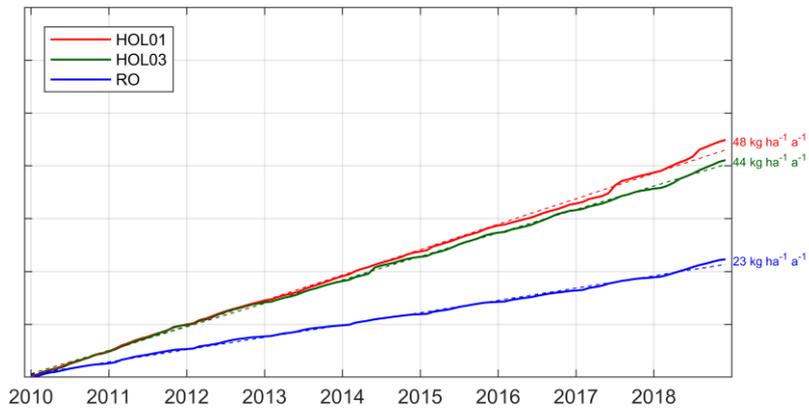
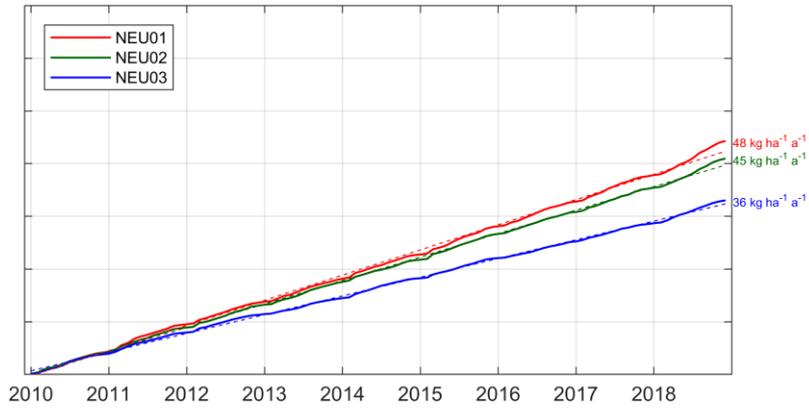






5.6 Frachten





5.7. Anmerkungen zur statistischen Analyse

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

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad \text{mit } i=1, \dots, n \text{ und die zufälligen Fehler } \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n \sim N(0, \sigma^2)$$

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

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

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