

AMMONIAK-MESSBERICHT



Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2016

Version: 12.01.2018

Autoren: Susanne Bieri, inNET Monitoring AG
Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 4 -
1.1	Richtwerte und Beurteilung	- 6 -
1.2	Übersicht Messungen in der Zentralschweiz	- 8 -
1.2.1	Kanton Luzern.....	- 8 -
1.2.2	Zentralschweizer Kantone Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug.....	- 9 -
1.2.3	Kanton Zug.....	- 9 -
1.2.4	Wauwil, Luzern	- 11 -
1.2.5	Eschenbach, Luzern	- 11 -
1.2.6	Neudorf, Luzern.....	- 12 -
1.2.7	Schüpfheim, Luzern	- 13 -
1.2.8	Holderhus, Luzern	- 13 -
1.2.9	Root Michaelskreuz, Luzern	- 14 -
1.2.10	Nidwalden	- 15 -
1.2.11	Obwalden	- 16 -
1.2.12	Schwyz	- 17 -
1.2.13	Uri	- 18 -
1.2.14	Zug	- 19 -
1.2.15	Rigi-Seebodenalp (NABEL).....	- 21 -
1.3	Messperioden aller Messpunkte	- 22 -
1.4	Qualitätssicherung der Messungen.....	- 25 -
1.4.1	Messunsicherheit Passivsammler	- 25 -
2	NH ₃ -Belastung	- 26 -
2.1	Mittlerer Jahresgang	- 26 -
2.2	Mehrjahresmittelwerte	- 27 -
2.3	Verlauf der Ammoniakkonzentration.....	- 29 -
2.4	Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung.....	- 33 -
3	Trendanalyse	- 35 -
3.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	- 35 -
3.2	Jahresmittel-Trends nach Messpunkte	- 38 -
3.3	Stickstofffrachten durch Ammoniak	- 41 -
3.4	Einfluss der Meteorologie auf NH ₃ -Trends.....	- 46 -
4	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	- 47 -

5	Anhang	- 49 -
5.1	Charakterisierung der Messpunkte.....	- 50 -
5.2	Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten	- 52 -
5.3	Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2010 - 2016)..	- 53 -
5.4	Trendberechnungen.....	- 54 -
5.4.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	- 54 -
5.4.2	Jahresmittel-Trends.....	- 55 -
5.5	Frachten.....	- 60 -

1 Einleitung

Ammoniak (NH_3) ist ein stickstoffhaltiger Luftschadstoff, der es vermag, Stickstoff über die Luft in umliegende Ökosysteme einzutragen. Erhöhte Stickstoffeinträge versauern und überdüngen empfindliche Ökosysteme, was zu einem Verlust der Artenvielfalt sowie zum Austrag von Nitrat ins Grundwasser führen kann. Nebst dem negativen Einfluss auf Ökosysteme trägt Ammoniak auch wesentlich zur Bildung von sekundärem Feinstaub bei und hat somit auch direkte negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.

In der Schweiz haben zwei Drittel der Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme ihren Ursprung in Ammoniakemissionen der Landwirtschaft.¹ An den gesamten Ammoniakemissionen trägt die Landwirtschaft zu 93 % 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 %).²

Im Jahr 2015 betragen die Ammoniakemissionen aus dem Sektor Landwirtschaft landesweit 56.5 kt. Von 1990 bis 2003 zeigt sich eine Abnahme der Ammoniakemissionen, hauptsächlich zurückzuführen auf die Reduzierung der Tierbestände. Von 2003 bis 2008 war ein zwischenzeitlicher Anstieg der Ammoniakemissionen zu beobachten, seither setzt sich der leichte Abwärtstrend wieder fort (Abbildung 1).³

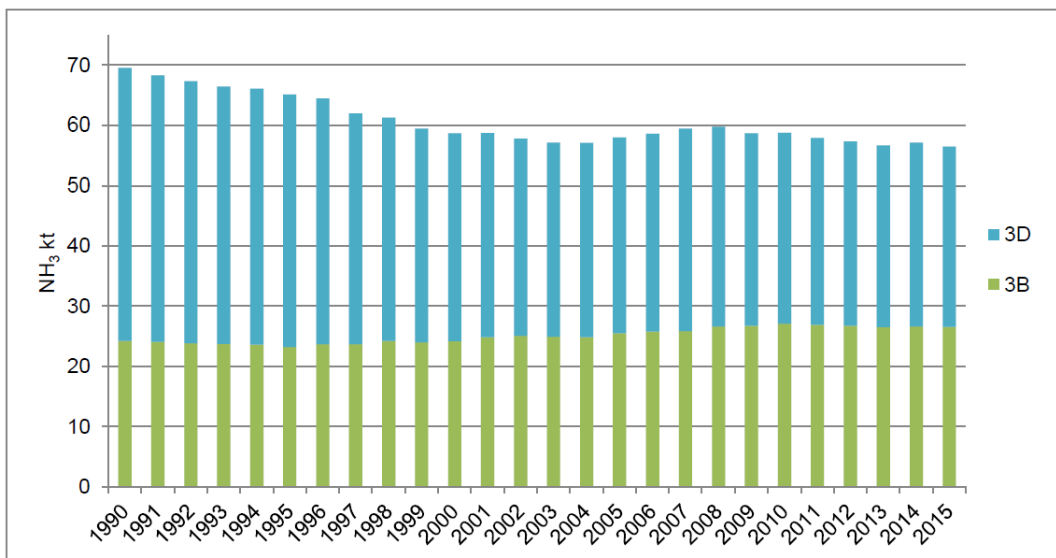


Abbildung 1: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft in der Schweiz von 1990 bis 2015 aufgeteilt in die Quellkategorien 3B („manure management“ Entmistungstechnik) und 3D („crop production and agricultural soils“ Pflanzenanbau und Kulturböden).³

¹<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/stickstoffhaltige-luftschadstoffe-beeintraechtigen-auch-die-biod.html> [Stand: 05.09.2017]

² Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Bonjour Engineering GmbH, METEOTEST, Oetiker+Partner AG (2013): Ammoniakemissionen in der Schweiz 1990-2010 und Prognose bis 2020

³ FOEN (2017): Switzerland's Informative Inventory Report 2017 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Submission of March 2017 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment FOEN, Air Pollution Control and Chemical Division, Bern.

Seit 2008 kann der Bund Massnahmen zur Senkung von Ammoniak-Emissionen 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 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. Dieses hatte zum Ziel, die Zentralschweizer Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft pro Jahr um 206 t gegenüber 2007/08 zu senken. Dazu wurden erfolgreich Massnahmen wie die Abdeckung von bestehenden offenen Güllelagern oder die Gülleausbringung mit Schleppschlauchverteiltern realisiert. Kaum umgesetzt wurden jedoch bauliche Massnahmen im Stall. Das Projektziel wurde noch nicht erreicht, weshalb es gilt, weitere Massnahmen umzusetzen: Die Beratung/Sensibilisierung muss ausgebaut sowie der Anteil der mit dem Schleppschlauchverteiler ausgebrachten Gülle erhöht werden. Der Fokus sollte auf Neu- und Umbauten, auf Emissionen beim Rindvieh sowie die verschmutzte Lauffläche gelegt werden.⁴ Zu diesem Zweck wurde unter www.ammoniak.ch ein Projekt eingerichtet, welches mit Fokus auf bauliche Massnahmen der Wissenstransfer zur Reduktion von Ammoniakverlusten aus der Landwirtschaft beschleunigen soll.

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 sieht als Etappenziel 2017 eine Einschränkung der Ammoniakemissionen auf 41'000 t. Drei Massnahmen der allgemeinen Agrarpolitik 2014-2017 werden sich positiv auf dieses Projektziel auswirken. Es sind dies die Pakete «Aufhebung der allgemeinen Tierbeiträge», «Einführung HODUFLU»⁵ und «Einführung Ressourceneffizienzbeiträge für emissionsarme Ausbringtechniken».⁶

Der Einfluss der Ammoniakemissionen auf die Umwelt ist gross. Eine Studie im Auftrag des BAFU zeigte, dass die 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 (siehe Abbildung 2).⁹

⁴ Uebersax, A. (2016): Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz, Schlussbericht 2015. AGROFUTURA

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 Seitler E. und Thöni L. (2017): Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz, 2000 bis 2016, Messbericht, FUB- Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 77 S.

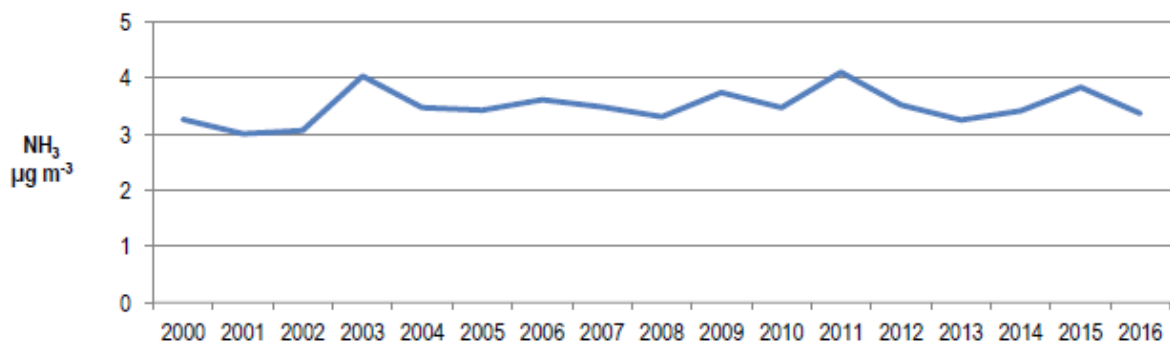


Abbildung 2: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen von 13 Immissions-Messtandorten der Schweiz, an denen seit 2000 durchgehend gemessen wird (nach Seitler E. und Thöni L. (2017)⁹)

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

In einem publizierten Bericht ist die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)¹¹ der Frage nachgegangen, ob es Sinn macht, einen Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der Luftreinhalteverordnung (LRV) festzulegen. 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.

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

- Die tatsächliche N-Belastung liegt deutlich höher, als sie sich aus der alleinigen Betrachtung ausschliesslich anhand der Ammoniak-Konzentrationen ergibt.
- „Lokale“ Ammoniak-Emissionen, 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 Empfehlung wurden folgende Punkte formuliert:

- Es soll kein Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der LRV festgelegt werden. Der Stellenwert der *Critical Loads* für Stickstoff soll dagegen gestärkt werden. Zur Beurteilung der Übermässigkeit sollen aber auch im Bedarfsfall die *Critical Levels* für Ammoniak herangezogen werden. Die Einhaltung des *Critical Levels* für Ammoniak allein löst das Problem der zu hohen Stickstoffeinträge noch nicht.
- Entscheidend zur 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 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 4). In den folgenden Kapiteln 1.2.4 bis 1.2.15 sind die einzelnen Messgebiete genauer beschrieben. Alle Messpunkte sind in der Tabelle 3 im Anhang (Kapitel 5.1) im Detail charakterisiert.

Seit dem Jahr 2012 erfolgt die Berichterstattung über die Ammoniakmessungen durch die Firma inNET Monitoring AG. Der Ammoniak-Messbericht 2012 wurde im Auftrag der Dienststelle Umwelt und Energie des Kantons Luzern erstellt.¹³ In den Folgejahren wurden gemeinsame Ammoniak-Messberichte für die Zentralschweiz verfasst.^{14,15,16} Im vorliegenden Bericht werden im Auftrag der Zentralschweizer Umweltdirektionen (ZUDK) die Ammoniak-Messdaten der gesamten Zentralschweiz bis Ende 2016 ausgewertet.

1.2.1 Kanton Luzern

Der Kanton Luzern hat im Jahr 2000 mit dem Aufbau eines kantonalen Ammoniakmessnetzes mittels Passivsammlern begonnen. Ab dem Jahr 2004 wurde das Ammoniak-Messnetz deutlich ausgebaut. Mit mehreren Beprobungen in einem Gebiet wurden auch methodische Fragen geklärt. Diese Messungen sind im ausführlichen Ammoniak-Messbericht der Dienststelle Umwelt und Energie (uwe) Luzern beschrieben.¹⁷ Das Messnetz diente als Grundlage für die Erstellung und Überwachung des Lufthygiene-Massnahmenplans Ammoniak sowie aktuell und in Zukunft auch als Wirkungsmonitoring für den Erfolg des Ressourcen-Programms zur Ammoniakminderung.¹⁸ In diesem «Ressourcenprojekt Stickstoff» wurden von 2009 bis 2014 entsprechende Massnahmen zur Ammoniakminderung umgesetzt. Der Zielpfad des Kantons Luzern sah vor, die Ammoniakemissionen bis ins Jahr 2010 auf dem Stand 2000 zu stabilisieren (100 %) und dann bis ins Jahr 2030 um 30 % zu senken. Das langfristige Ziel ist es, die Emissionen auf die *Critical Loads* zu reduzieren. Ein Teil der Massnahmen vom Massnahmenplan Luftreinhaltung, Teilplan Ammoniak¹⁸ werden auch ab 2015 mit Ressourceneffizienzbeiträgen (Direktzahlungsverordnung) weitergeführt. Im Kanton Luzern sind insgesamt sechs Messgebiete vorhanden. In jedem Messgebiet gibt es mehrere Messpunkte (Abbildung 3). Nachfolgend werden die Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit (z. B. Messgebiet Wauwil) benannt, z. T. wird «Kanton Luzern» hinzugefügt.

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

¹⁸ Kanton Luzern, Umwelt und Energie (2007): Massnahmenplan Luftreinhaltung, Teilplan Ammoniak

1.2.2 Zentralschweizer Kantone Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug

Wie bereits in der Einführung erwähnt, betrieben die anderen fünf Zentralschweizer Kantone Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug im Rahmen des «Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz» Ammoniakmessungen in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten (siehe Abbildung 3). Diese Messungen erfolgten gestützt auf Artikel 77a des Bundesgesetzes über die Landwirtschaft. Das Projekt startete im Jahr 2010 und dauerte bis Ende 2015, wobei die Messungen im Rahmen der Wirkungskontrolle des Ressourcenprojekts im Jahr 2016 (und auch 2017) weitergeführt wurden. Das Ziel dieses «Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz» war es, die Ammoniakemissionen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung gegenüber 2007 um 206 t Ammoniak-Stickstoff (9 %) zu reduzieren. Die Ammoniakkonzentration pro Kanton wurde in meist einer Geländekammer (definiert als Messgebiet) an drei Messpunkten gemessen. Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Kantonszugehörigkeit benannt (z. B. Messgebiet Uri), meist wird auf «Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz» verwiesen.

1.2.3 Kanton Zug

Zusätzlich betreibt der Kanton Zug seit 2007 ein kantonales Ammoniakmessnetz mit vier Messgebieten (siehe Abbildung 3). Auf dem Kantonsgebiet liegt zudem die Station Zugerberg, welche seit dem Jahr 2000 vom Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) betrieben wird und ebenfalls mit Passivsammlern Ammoniak misst. Vier der kantonalen Stationen befinden sich in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen wie Moor, Naturschutzgebiet oder Wald (Frauental, Zugerberg, Frübüel und Zigerhüttli). Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit benannt (z. B. Messgebiet/Messpunkt Zugerberg), meist wird auf «kantonale Passivsammler im Kanton Zug» hingewiesen.

Im April 2016 wurde im Kanton Zug der Massnahmenplan Ammoniak 2016 bis 2030 verabschiedet.¹⁹ Dieser Massnahmenplan Ammoniak enthält verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Ammoniakverluste in der Landwirtschaft (Gülleausbringung, Abdeckung Hofdüngerlager, Massnahmen bei Neu- und Umbauten bei Ställen, stickstoffreduzierte Fütterung). Mit diesem Massnahmenpaket sollen die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft bis 2020 um rund 20 % und bis 2030 um 30 % reduziert werden.

¹⁹ Stofer et al. (2015): Massnahmenplan Ammoniak 2016 – 2030 Kanton Zug

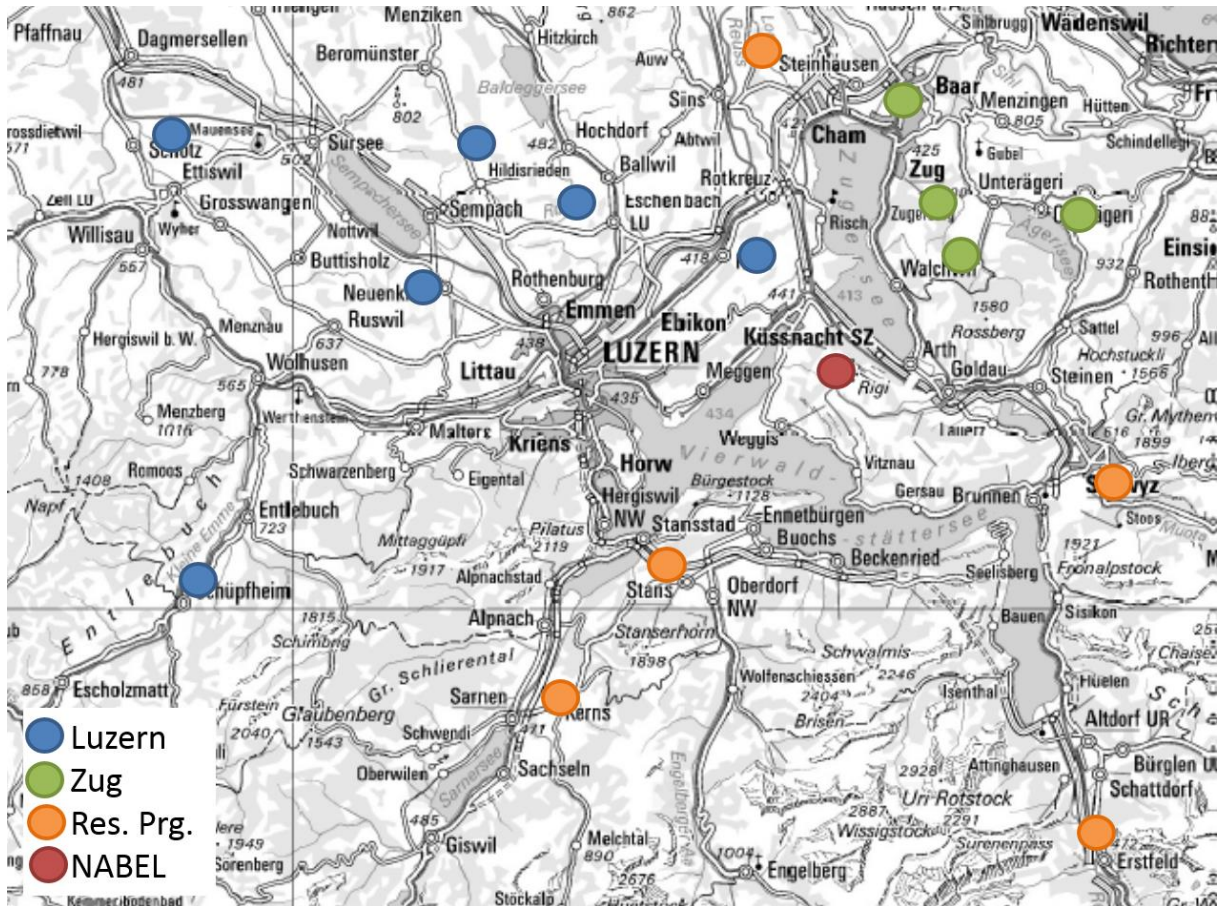


Abbildung 3: Gesamtübersicht der Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz: Die Punkte stehen entweder für Messgebiete, in welchen in der Regel mehrere Messpunkte vorhanden sind, oder auch für einzelne Messpunkte.

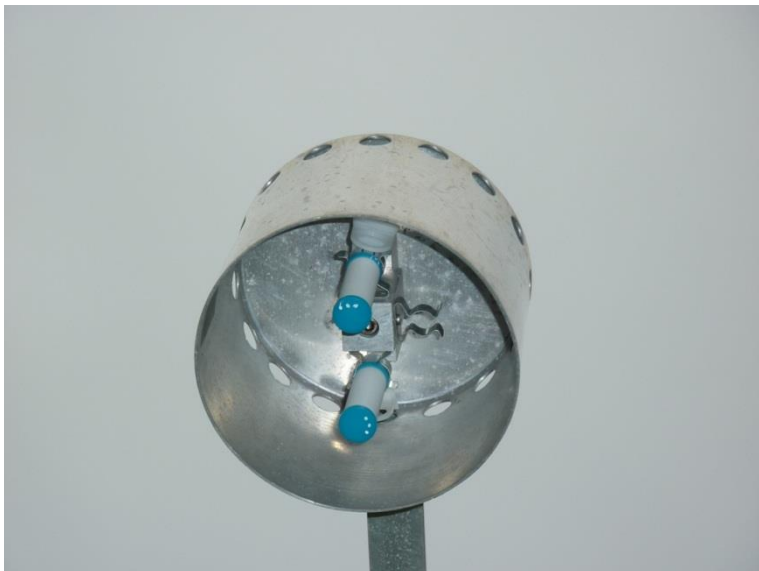


Abbildung 4: Zwei NH_3 -Passivsammlerröhrcchen im Wetterschutzgehäuse

1.2.4 Wauwil, Luzern

Im Messgebiet Wauwil (Abbildung 5) 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 5: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Wauwil. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche im Jahr 2016 in Betrieb sind.

1.2.5 Eschenbach, Luzern

Im Messgebiet Eschenbach (Abbildung 6) 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 6: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Eschenbach. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche im Jahr 2016 in Betrieb sind.

1.2.6 Neudorf, Luzern

An den drei Messpunkten im Gebiet Neudorf (Abb. 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 7: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Neudorf. Alle Messpunkte sind im Jahr 2016 in Betrieb.

1.2.7 Schüpflheim, Luzern

Das Messgebiet Schüpflheim besteht heute aus drei Messpunkten (Abbildung 8). 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.

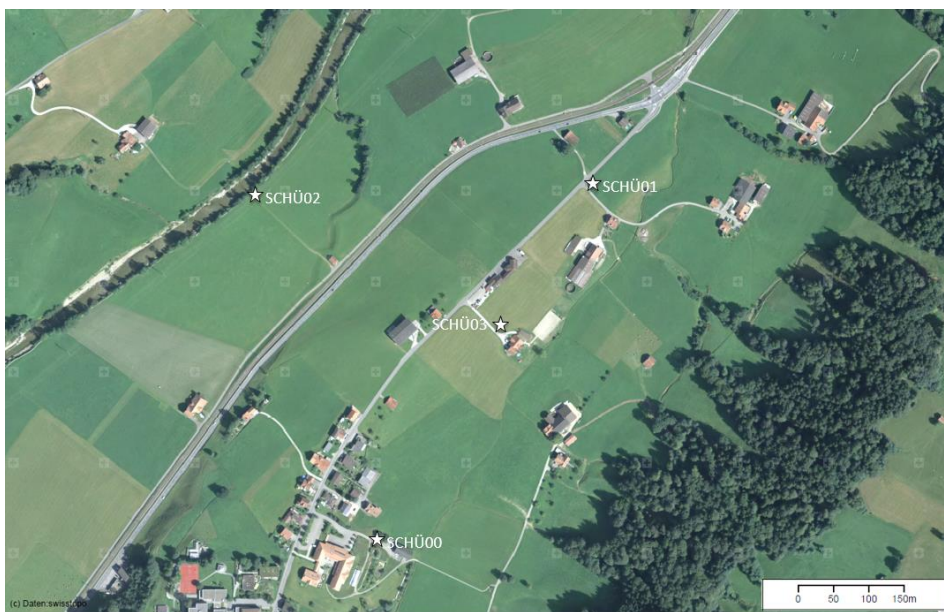


Abbildung 8: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Schüpflheim. Messpunkt SCHÜ00 und SCHÜ02 sind im Jahr 2016 ganzjährig in Betrieb, SCHÜ03 löste im Juni 2016 den Messpunkt SCHÜ01 ab.

1.2.8 Holderhus, Luzern

Im Jahr 2000 starteten die Ammoniakmessungen im Gebiet Holderhus (Abbildung 9). 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 9: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Holderhus. Schwarze Kreise markieren diejenigen Messpunkte, welche im Jahr 2016 in Betrieb sind.

1.2.9 Root Michaelskreuz, Luzern

Im Messgebiet Root Michaelskreuz wird die Ammoniakkonzentration seit 2011 an einem Messpunkt erfasst (Abbildung 10). 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 10: Räumliche Übersichtsgrafik des Messgebietes Root Michaelskreuz. Der Messpunkt ist im Jahr 2016 in Betrieb.

1.2.10 Nidwalden

Im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz wurden im Kanton Nidwalden drei Messpunkte installiert. Die Messungen starteten im Jahr 2010 (Abbildung 11). 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 11: Räumliche Übersicht im Messgebiet Nidwalden.

1.2.11 Obwalden

Im Kanton Obwalden wurden im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz drei Messpunkte installiert (Abbildung 12). 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 12: Räumliche Übersicht im Messgebiet Obwalden.

1.2.12 Schwyz

Im Talkessel von Schwyz in der Nähe von Ibach liegen die drei Ammoniak-Messpunkte des Kantons Schwyz (Abbildung 13). Diese drei Messpunkte wurden ebenfalls im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz installiert. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt.



Abbildung 13: 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 2013²⁰ so gewählt.



Abbildung 14: Messpunkt WAN01 und räumliche Übersicht im Messgebiet Wangen.

1.2.13 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.

²⁰ puls (2014): Flechten und Luftqualität in Ausserschwyz Ost: Wirkungskontrolle 2013. Amt für Umweltschutz Kanton Schwyz. 50 S.



Abbildung 15: Räumliche Übersicht im Messgebiet Uri.

1.2.14 Zug

Neben fünf kantonalen Messstationen hat der Kanton Zug im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz zusätzlich drei Messpunkte installiert (siehe Abbildung 16). 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 16: 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 17). 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 17: Räumliche Übersicht der kantonalen Passivsammler von Zug sowie der Passivsammler des „Ressourcenprojekts Ammoniak“.

1.2.15 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 18).

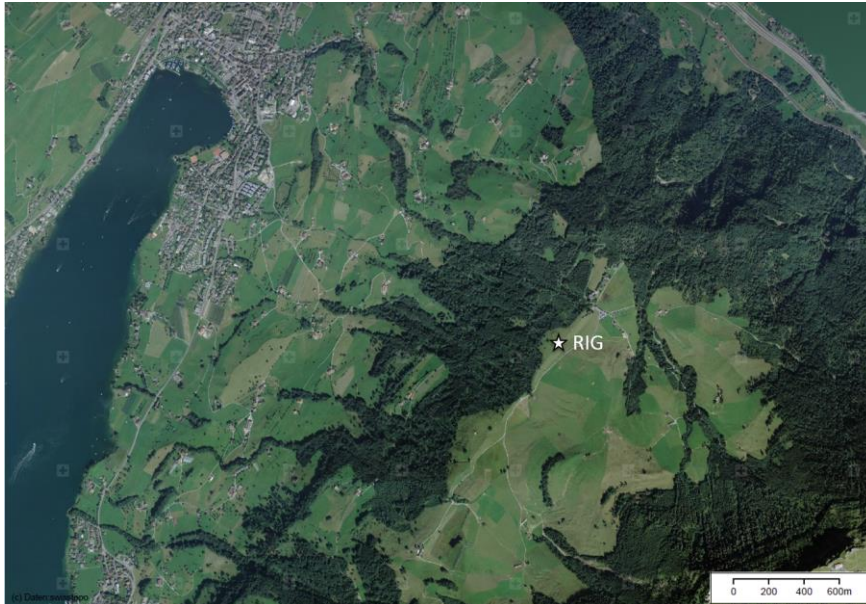


Abbildung 18: Räumliche Übersicht im Gebiet der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp.

1.3 Messperioden aller Messpunkte

Abbildung 19 zeigt eine graphische Darstellung der Messperioden für alle Messpunkte in der Zentralschweiz inklusive NABEL-Station Rigi-Seebodenalp. Die frühesten Messungen begannen 1999 in den Gebieten Wauwil, Holderhus, Schüpflheim sowie auf dem Zugerberg und der Rigi-Seebodenalp. Ab dem Jahr 2004 wurden im Kanton Luzern verschiedene Messkampagnen durchgeführt (z. B. Ost-West-Transsekt, 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 19 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 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 10.01.2008 war am Messpunkt ZB00 nur ein Passivsammler, auf 1.3 m über Grund exponiert, in Betrieb. Vom 28.02.2008 bis 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.²¹

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 Ge-

²¹ Seitler, E., Thöni, L., Schnyder, R., Rihm, B. (2013): Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz, Beschreibung der Standorte und Daten. Bezugsquelle: FUB, 8640 Rapperswil

biet). 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.

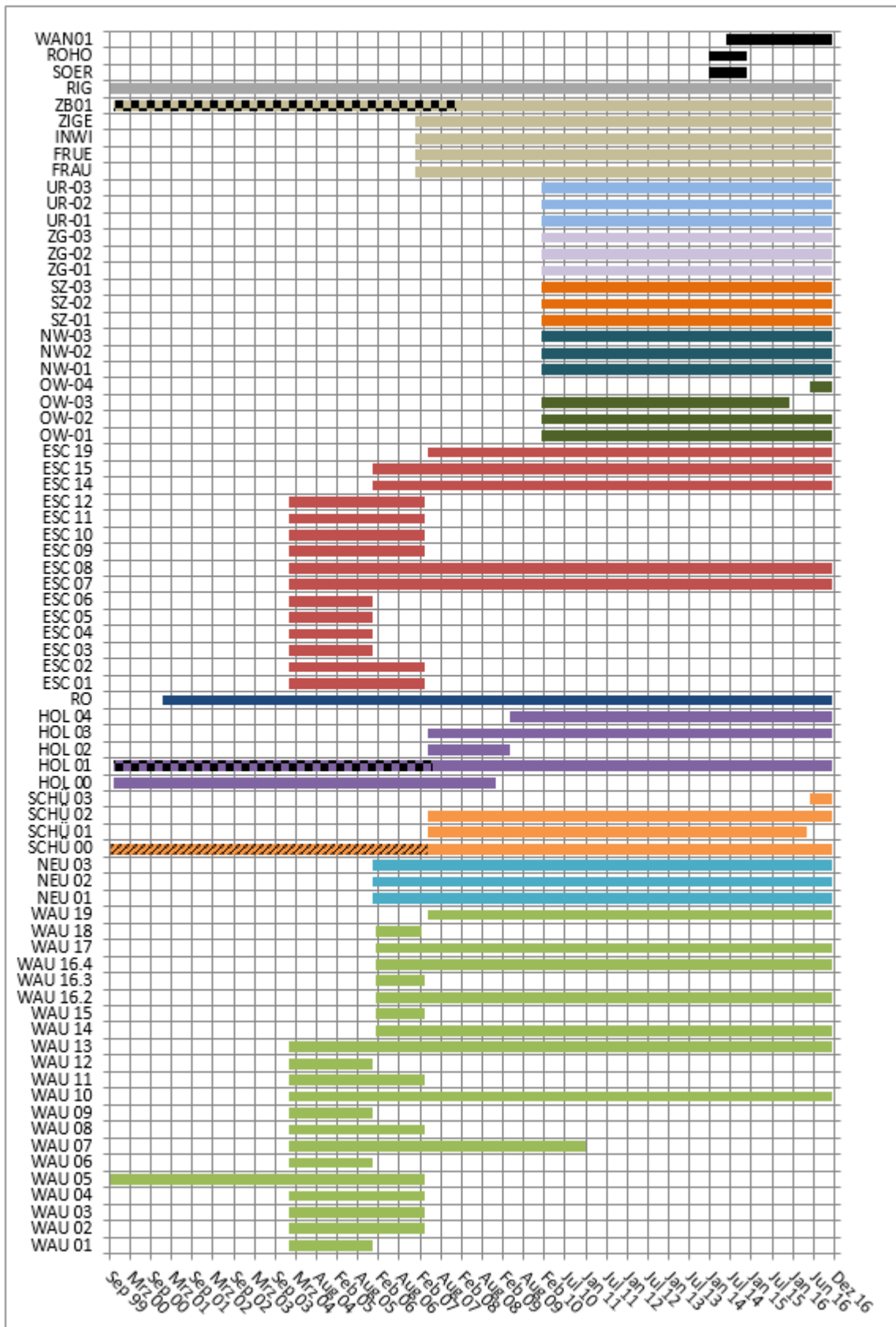


Abbildung 19: Zeitliche Übersichtstabelle aller Messpunkte in der Zentralschweiz, farblich unterteilt in die verschiedenen Messgebiete. Bei Messpunkten, welche innerhalb der Messung verschoben wurden, sind die Balken mit schwarzen Schrägstrichen markiert. Die Werte von HOL01 vor Juni 2007 (schachbrettartig gemustert) sind rückwirkend korrigiert worden,^{22,23} das Gleiche gilt für die Werte von ZB01 vor 2008 (ebenfalls schachbrettartig gemustert).²⁴

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 Messunsicherheit²⁵ 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.²⁶ Daraus kann eine Unsicherheit (90 %-Bereich) von $0.17 \mu\text{g m}^{-3}$ für einen Jahresmittelwert abgeleitet werden.

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

²⁵ Dämmgen et al. (2010): Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig, Landbauforschung Sonderheft 337

²⁶ 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 20). Die Grafiken der Jahresgänge der übrigen Messstandorte sind im Anhang in Kapitel 5.3 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 kann man Vermutungen über die Ursachen der typischen Jahresgangkurven anstellen.

Die Messungen in Zug und Obwalden zeigen, dass Standorte mit intensiver Tierhaltung einen deutlichen Höchstwert im März zeigen (Abbildung 20). 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 Kanton 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.

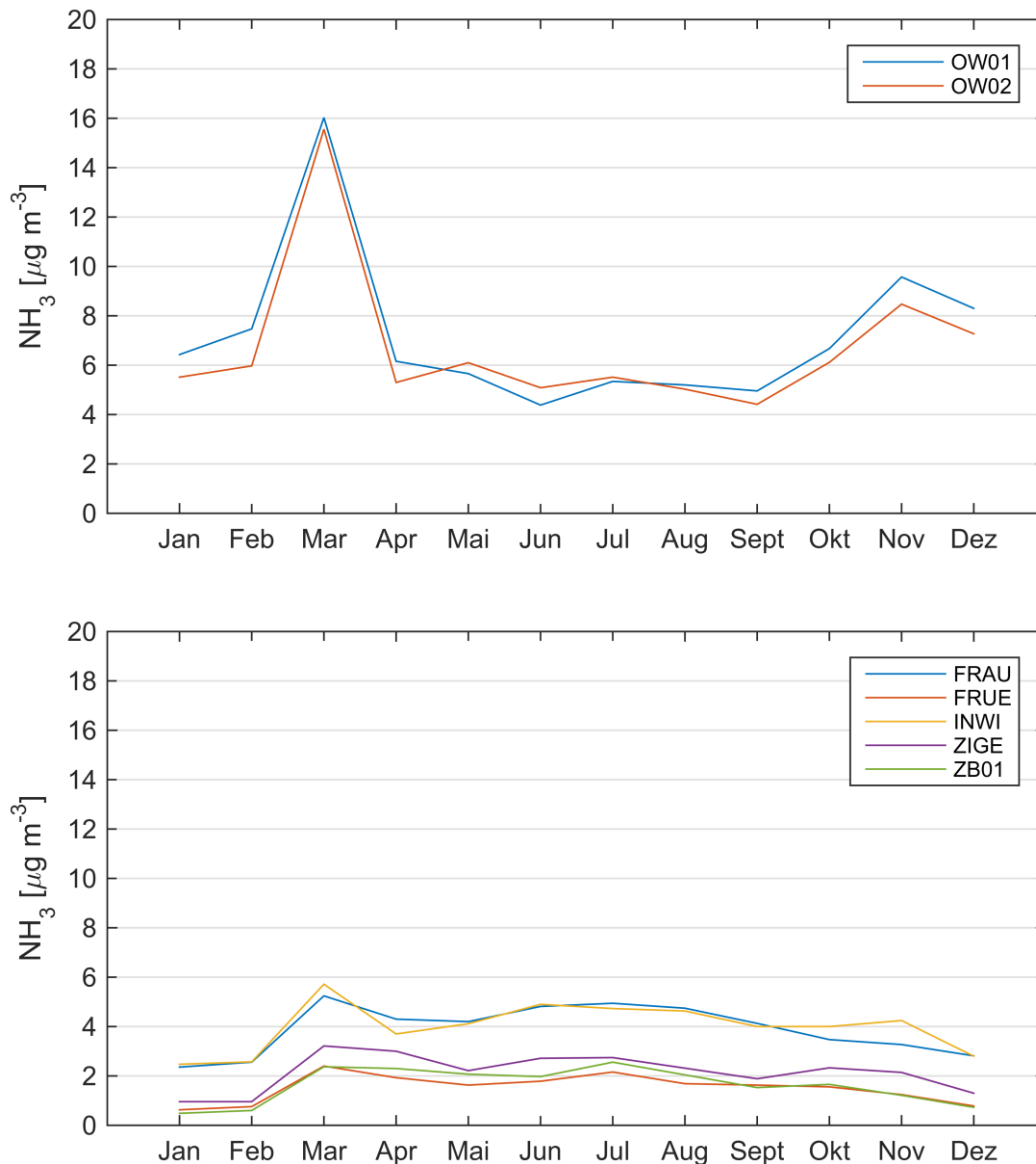


Abbildung 20: Vergleich des Jahresgangs unterschiedlicher Messpunkte mit unterschiedlicher Bewirtschaftung. Mittelung von 2010 bis 2016. Oben: Messpunkte von Obwalden (Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz). Unten: Kantonale Messpunkte von Zug.

2.2 Mehrjahresmittelwerte

Die Jahresmittel der Ammoniak-Konzentrationen ausgewählter Messpunkte über die jeweilige Messperiode sind auch im Anhang, Kapitel 5.2, eingefügt. Tabelle 1 und Abbildung 21 zeigen die mehrjährigen Jahresmittel der Ammoniakkonzentration der verschiedenen Messgebiete.²⁷ Der *Critical Level* von

²⁷ 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 $\mu\text{g m}^{-3}$ (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 - 2016) der Ammoniakkonzentration in den verschiedenen Messgebieten

Messgebiet	Mehrjähriges Mittel (2010 – 2016) NH ₃ -Konzentration
Wauwil (WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19)	7.9 $\mu\text{g m}^{-3}$
Eschenbach (ESC07, ESC08, ESC14, ESC15, ESC19)	8.5 $\mu\text{g m}^{-3}$
Holderhus (HOL01, HOL03)	5.9 $\mu\text{g m}^{-3}$
Schüpfheim (SCHÜ00, SCHÜ02)	6.6 $\mu\text{g m}^{-3}$
Root, Michaelskreuz (RO)	3.0 $\mu\text{g m}^{-3}$
Neudorf (NEU01, NEU02, NEU03)	5.4 $\mu\text{g m}^{-3}$
Nidwalden (NW-01, NW-02, NW-03)	6.6 $\mu\text{g m}^{-3}$
Obwalden (OW-01, OW-02)	7.0 $\mu\text{g m}^{-3}$
Schwyz (SZ-01, SZ-02, SZ-03)	5.0 $\mu\text{g m}^{-3}$
Uri (UR-01, UR-02, UR-03)	6.2 $\mu\text{g m}^{-3}$
Zug (ZG-02, ZG-03)	7.6 $\mu\text{g m}^{-3}$
Kloster Frauental (FRAU)	3.9 $\mu\text{g m}^{-3}$
Früebüel (FRÜE)	1.5 $\mu\text{g m}^{-3}$
Inwil (INWI)	4.0 $\mu\text{g m}^{-3}$
Zigerhüttli (ZIGE)	2.1 $\mu\text{g m}^{-3}$
Zugerberg 1 (ZB01)	1.6 $\mu\text{g m}^{-3}$
Rigi-Seebodenalp (RIG)	1.4 $\mu\text{g m}^{-3}$

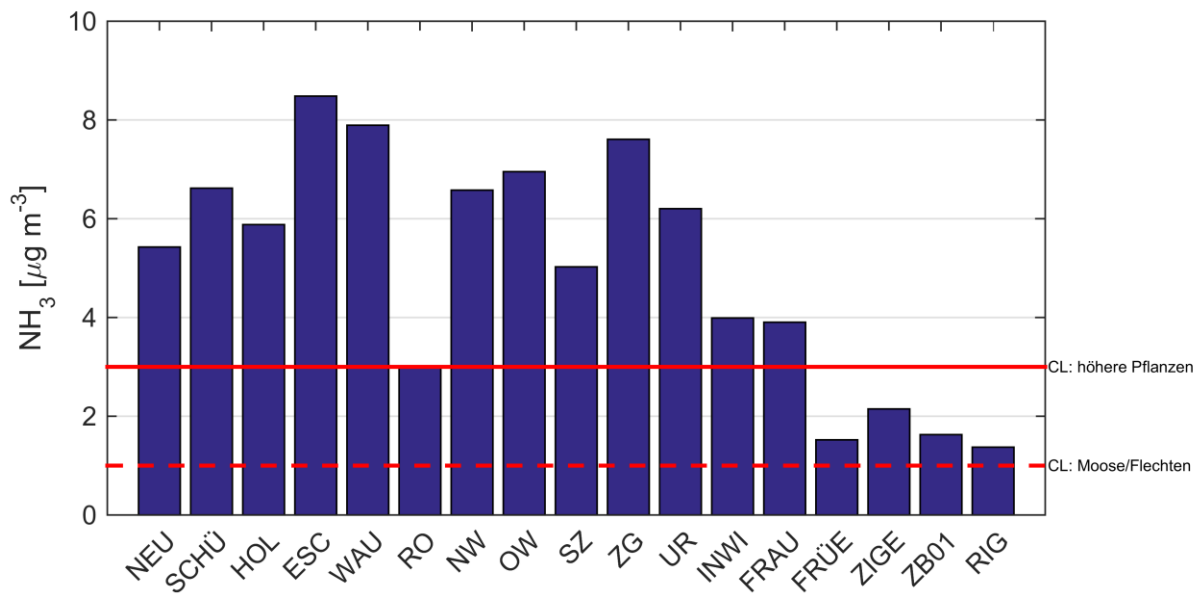


Abbildung 21: Mehrjähriges Mittel (2010 - 2016) der Ammoniakkonzentration in den einzelnen Messgebieten. Die rote ausgezogene Linie kennzeichnet den *Critical Level* (CL) für höhere Pflanzen, die rote gestrichelte Linie den *Critical Level* (CL) für empfindliche Moose und Flechten.

2.3 Verlauf der Ammoniakkonzentration

Eine detaillierte Darstellung der Jahresmittel seit 2007 aller Ammoniakmesspunkte im Kanton Zug zeigt deutlich, dass die *Critical Levels* über alle Messjahre an mehreren Stationen überschritten werden (Abbildung 22). In drei Messgebieten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen (Früebüel, Zigerhüttli und Zugerberg) wird der *Critical Level* für Moose und Flechten überschritten. Im Jahr 2013 wurde an den meisten Standorten die niedrigste Ammoniakkonzentration seit Messbeginn gemessen. Dabei wurden in jenem Jahr hauptsächlich tiefe Frühjahres- und Sommermittelwerte registriert, welche meteorologisch auf den langanhaltenden Winter und die nassen Bedingungen zurückzuführen waren. Je nach Standort sind ähnlich tiefe Ammoniakkonzentrationen wie im Jahr 2013 auch im Jahr 2016 ersichtlich. Alle Messpunkte ausser Zigerhüttli (ZIGE) zeigen im 2016 eine Abnahme des Jahresmittels der Ammoniakkonzentration im Vergleich zum Vorjahr. Der Einfluss der Witterung auf die Ammoniakkonzentration wird im Kapitel 3.4 beschrieben.

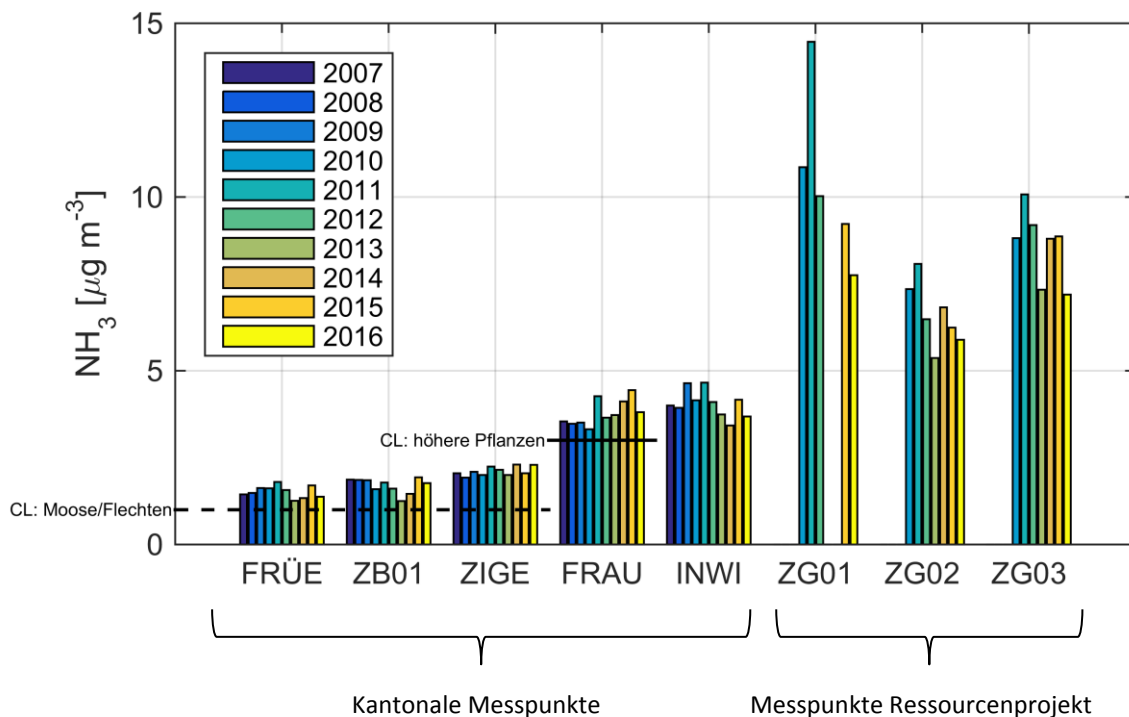


Abbildung 22: Jahresmittel (2007 bis 2016) der Ammoniakkonzentration an den einzelnen Messpunkten im Kanton Zug. Für ZG01 konnten aufgrund von Datenlücken keine gültigen Jahresmittel für 2013 und 2014 berechnet werden. Die schwarze ausgezogene Linie kennzeichnet den Critical Level (CL) für höhere Pflanzen, die schwarze gestrichelte Linie den Critical Level (CL) für empfindliche Moose und Flechten.

Abbildung 23 zeigt den Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne Luzern. Alljährlich ist ein «Peak» im März zu erkennen, wie in Kapitel 2.1 schon detailliert diskutiert wurde. Im Jahresverlauf gleichen sich die Jahre 2013 und 2016 sehr: Der «Peak» im März fiel deutlich geringer aus als in den übrigen Jahren. Während der Sommermonate pendelten die Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2016 um $5 \mu\text{g m}^{-3}$, um dann gegen Ende des Jahres nochmals deutlich anzusteigen. Weiter kann festgestellt werden, dass, wie bereits im Jahr 2015, im Messgebiet Uri die höchsten Ammoniakkonzentrationen des Jahres 2016 gegen Ende des Jahres (November 2016) gemessen wurden und nicht im Frühjahr wie in den anderen Messgebieten. Dieser Verlauf kann wahrscheinlich auf die Witterungsverhältnisse zurückgeführt werden (siehe Kapitel 3.4). Der Frühling 2016 brachte verbreitet reichlich Niederschlag, was dazu führte, dass Ammoniak nicht lange in der Luft verweilen konnte. Im November 2016 zeigte sich der Föhn mit aussergewöhnlicher Ausdauer, ausserdem herrschte beständiges Hochdruckwetter im Dezember. Insbesondere der Dezember war durch ein Niederschlagsdefizit geprägt.²⁸

²⁸ MeteoSchweiz (2016): Klimabulletin Jahr 2015, Zürich

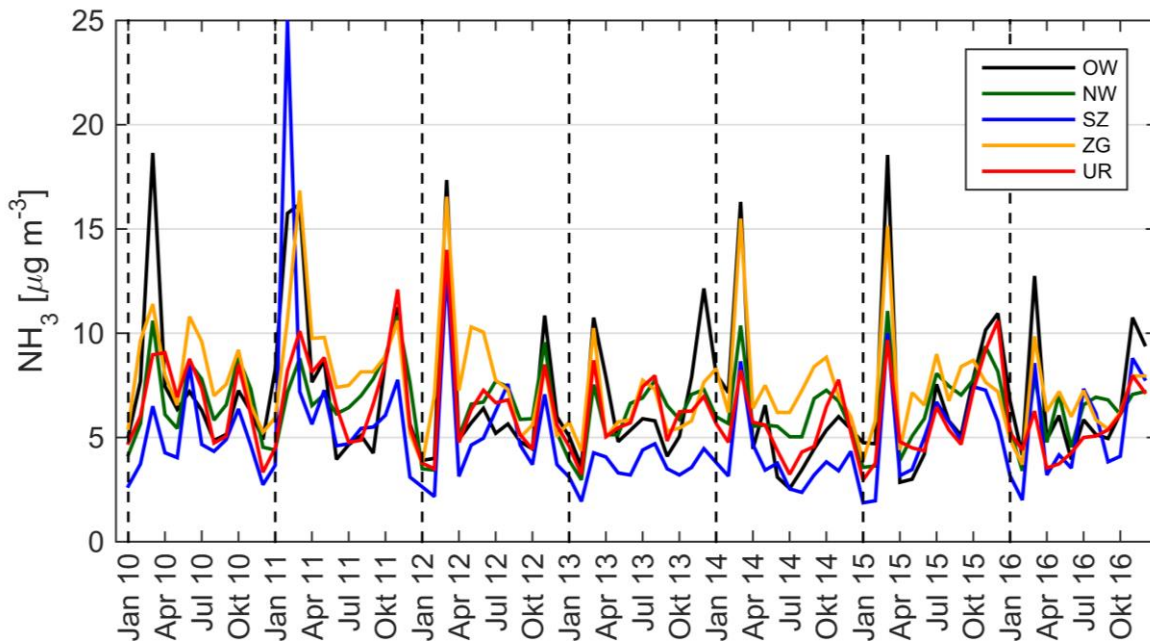


Abbildung 23: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne Luzern.

Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Ammoniakkonzentration für die Passivsammler in Kanton Zug seit Januar 2010. Die diversen Messstandorte im Kanton Zug können in drei Gruppen eingeteilt werden:

- **Hohe Belastung:** Passivsammler des Ressourcenprojekts²⁹. Der Verlauf der Ammoniakkonzentration ist mit denjenigen der übrigen Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweiz vergleichbar (siehe auch Abbildung 23). Diese Standorte liegen in Landwirtschaftsgebiet.
- **Mittlere Belastung:** Die Messstandorte Inwil und Frauental weisen eine mittlere Ammoniakbelastung auf, liegen somit leicht tiefer als die Messstandorte des Ressourcenprojekts. Beide Standorte zeigen auch ein Anstieg der Ammoniakkonzentration im Frühling 2016, dieser verläuft dann weiter bis in den Sommer 2016.
- **Tiefe Belastung:** Die Messstandorte Frübüel, Zigerhüttli und Zugerberg wurden bewusst in Gegenden mit geringer Belastung und in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen platziert, um die *Critical Level* an diesen Orten zu überprüfen. Wie auch in den anderen Jahren weisen diese Standorte einen Sprung vom Februar zu März 2016 in der Ammoniakkonzentration auf.

²⁹ Der Einheitlichkeit halber wurden hier nur die Werte von ZG-02 und ZG-03 verwendet.

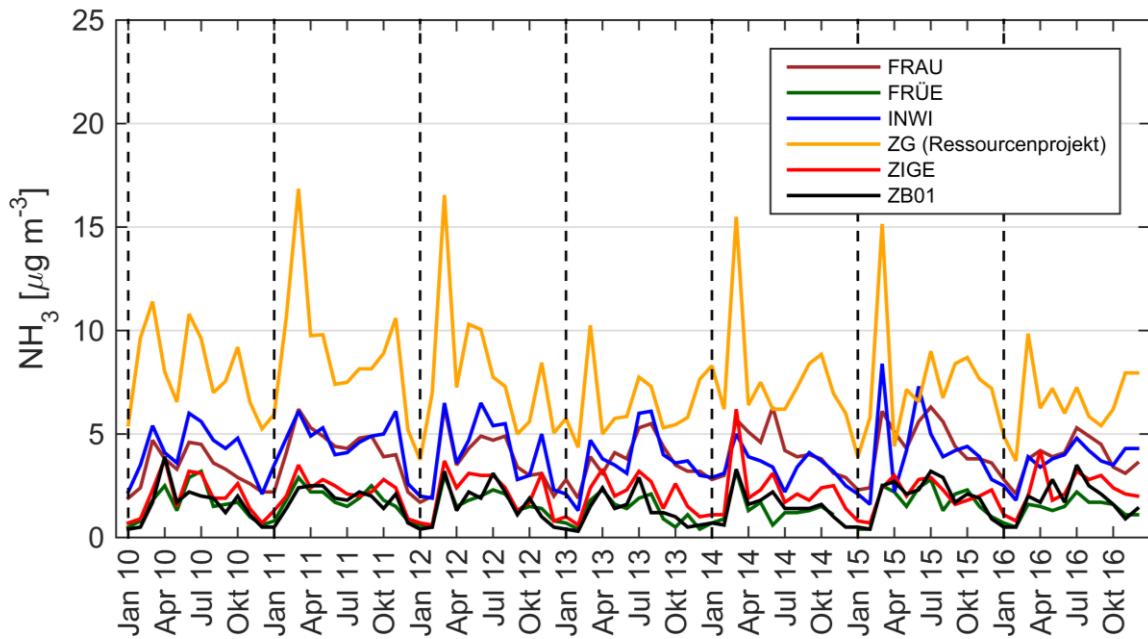


Abbildung 24: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den verschiedenen kantonalen Passivsammler-Standorten in Zug sowie den Zuger Ressourcenprojekt-Standorten (ZG).

Abbildung 25 zeigt den Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 für die Luzerner Standorte, gemittelt pro Messgebiet. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 eingeflossen. Die Ammoniakkonzentration verläuft in allen Regionen ungefähr parallel, am Messstandort Root Michaelskreuz ist die Ammoniakkonzentration deutlich geringer als bei den übrigen Messstandorten. Alle Standorte weisen einen ausgeprägten «Peak» im Frühling auf. Auffallend ist der «Einbruch» im Verlauf der Ammoniakkonzentration im Oktober 2016, im Gegensatz zu einem zweiten «Peak» in dieser Jahreszeit in anderen Jahren. Dieser wurde teilweise auch bei den Ressourcenprojekt-Standorten Zentralschweiz beobachtet und kann mit der nass-kalten Witterung in diesem Monat erklärt werden. Anders als die übrigen Messgebiete im Kanton Luzern zeigen sich im Messgebiet Eschenbach im 2016 die höchsten Ammoniakkonzentrationen während des Spätsommers, dies konnte auch im Jahr 2013 so beobachtet werden.

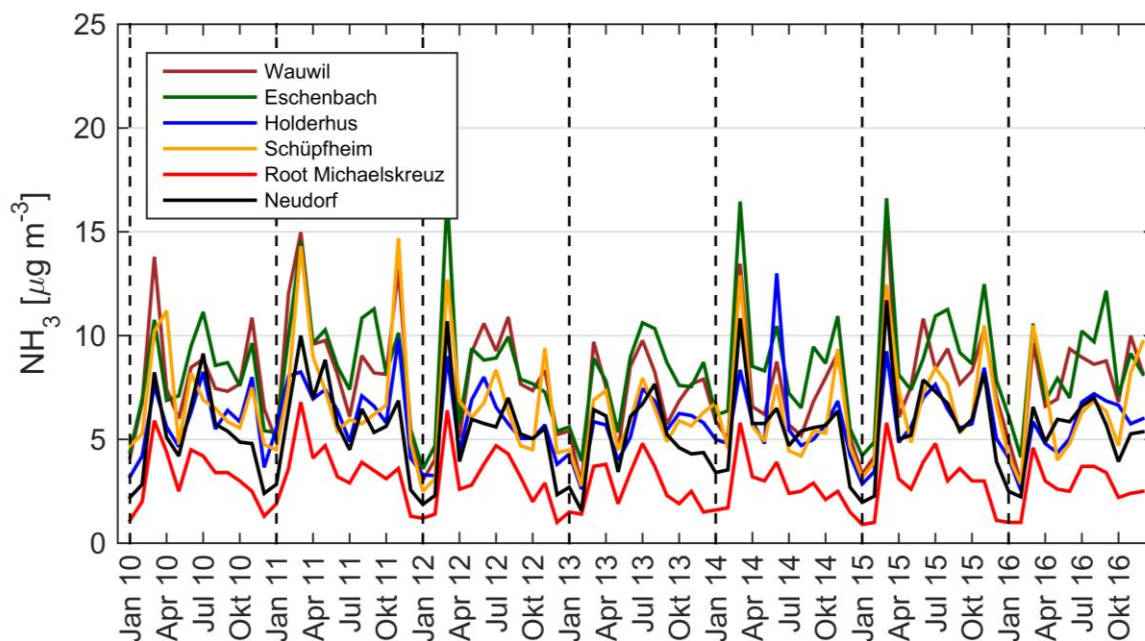


Abbildung 25: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010, gemittelt für jedes Messgebiet im Kanton Luzern.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen der Verläufe der Ammoniakkonzentration im Jahr 2016 festgehalten werden:

- Die Ammoniakkonzentrationen 2016 verlaufen ähnlich wie im Jahr 2013.
- Auffällig sind bei mehreren Standorten der Frühjahrespeak im März 2016 sowie ein Einbruch der Ammoniakkonzentration im Oktober 2016.
- Die meisten Standorte zeigen geringere Ammoniakkonzentration während der Sommermonate und ein erneutes Ansteigen im November/Dezember 2016.
- Insbesondere Messpunkte in stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten zeigen die zwei «Peak»-Verläufe (März und Dezember 2016).

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. In den früheren Berichten wurden mehrjährige Monatsmittelwerte visualisiert. Diese Betrachtungsweise ist sehr robust, die Aussagen ändern sich auch mit dem Einbeziehen vom Jahresmittel 2016 nicht wesentlich (z. B. nachzulesen im Ammoniak-Messbericht 2015³⁰). Deshalb wird hier anstelle der Mehrjahresmittel auf die Jahr-zu-Jahr Unterschiede eingegangen.

³⁰ Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2016): Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2015, inNET Monitoring AG

Exemplarisch sind hier zwei Messgebiete abgebildet: Das Messgebiet Zug (Mittelung über die Messpunkte gemäss Tabelle 1) und der Messpunkt Zugerberg, für die Variabilität wurden die Jahre 2011, 2013 und 2016 ausgewählt (Abbildung 26). Im stark landwirtschaftlich geprägten Messgebiet Zug (Abbildung 26 (a)) fällt der Monat März mit der höchsten Ammoniakbelastung ins Auge. Ein zweiter Peak der Ammoniakkonzentration ist gegen Ende des Jahres (November respektive Dezember) zu erkennen. Ausserdem zeigt sich hier exemplarisch die unterschiedliche Ammoniakbelastung von Jahr zu Jahr: Im Jahr 2011 wurden deutlich höhere Ammoniakkonzentrationen gemessen als in den beiden anderen dargestellten Jahren 2013 und 2016. Die zwei Jahre 2013 und 2016 sind vergleichbar. Der Anstieg der Ammoniakkonzentration im März fiel deutlich geringer aus als im Jahr 2011. Ausserdem verschob sich der zweite «Peak» vom November in den Dezember. Diese Unterschiede können mit grosser Wahrscheinlichkeit mit den meteorologischen Gegebenheiten erklärt werden.

Als Vergleich ist in Abbildung 26 (b) die Ammoniakkonzentration auf der Netzstruktur am Messpunkt Zugerberg dargestellt. Hier werden deutlich geringere Ammoniakkonzentrationen gemessen und der deutliche Frühlingspeak ist nicht ersichtlich. 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.

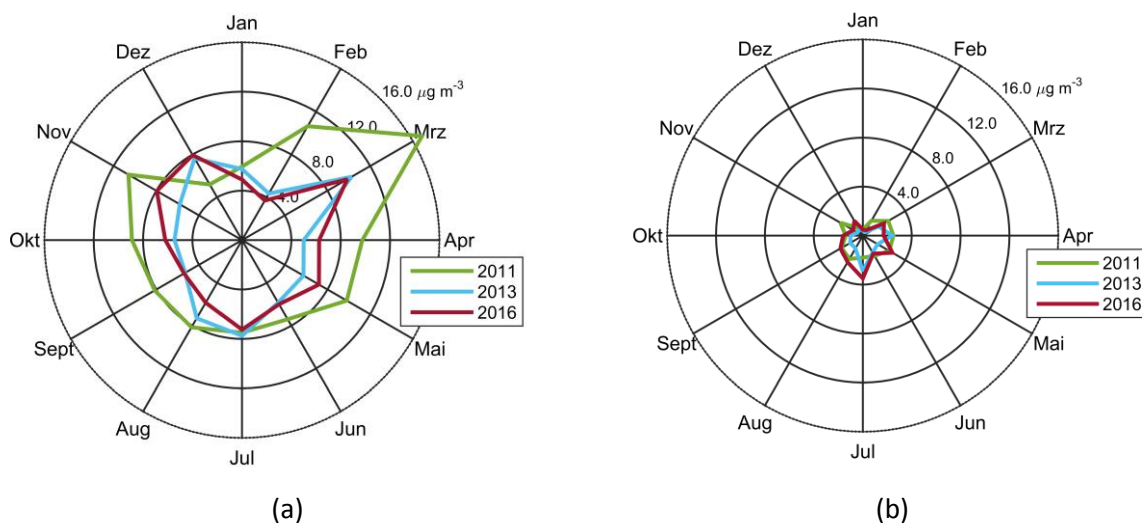


Abbildung 26: Darstellung der Monatsmittelwerte in Netzdiagrammen für (a) das Messgebiet Zug und (b) der Messpunkt Zugerberg für die Jahre 2011, 2013 und 2016.

3 Trendanalyse

3.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

Für die folgenden Abbildungen (Abbildung 27-Abbildung 30) wurden die Jahresmittelwerte der verschiedenen Messpunkte ab dem Jahr 2007 gemittelt und anschliessend eine Trendberechnung für das jeweilige Messgebiet durchgeführt. Exemplarisch sind hier vier Messgebiete abgebildet, die restlichen Grafiken sind im Anhang in Kapitel 5.4.1 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 welchen Grenzen sich die Parameter wahrscheinlich bewegen. Aus dem Vertrauensintervall lässt sich somit direkt die Signifikanz ablesen. Es wurden zur Mittelung jeweils nur Messstationen verwendet, welche repräsentativ für die Messgebiete sind und zudem genügend Messwerte zwischen 2007 und 2016 aufweisen. Die verwendeten Stationen sind in der Bildlegende aufgeführt.

In allen Messgebieten ist das Ammoniak-Jahresmittel 2016 geringer als in den Vorjahren. Dadurch zeigt sich je nach Gebiet eine Verringerung des positiven Trends (geringere Zunahme der Ammoniakkonzentration) oder sogar ein negativer Trend (Abnahme der Ammoniakkonzentration). Je nach Messgebiet können aber unterschiedliche Entwicklungen der Ammoniakkonzentration seit 2007 festgestellt werden: Das Messgebiet Wauwil (Abb. 29) zeigt über die letzten 10 Jahren schwankende Ammoniakkonzentration, das Messgebiet Neudorf (Abb. 30) seit letztem Jahr eine statistisch signifikante Zunahme der Ammoniakkonzentration ($+0.12 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$). Diese Zunahme hat sich im Vergleich zum Vorjahr leicht abgeschwächt (Trendberechnung 2007–2015: $+0.16 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$). Die hier exemplarisch ausgewählten zwei Messgebiete im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz Nidwalden und Uri (Abb. 31 und 32) zeigen seit dem Jahr 2010 abnehmende Ammoniakkonzentrationen. Diese Abnahme ist im Messgebiet Uri nun auch statistisch signifikant ($-0.26 \mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$).

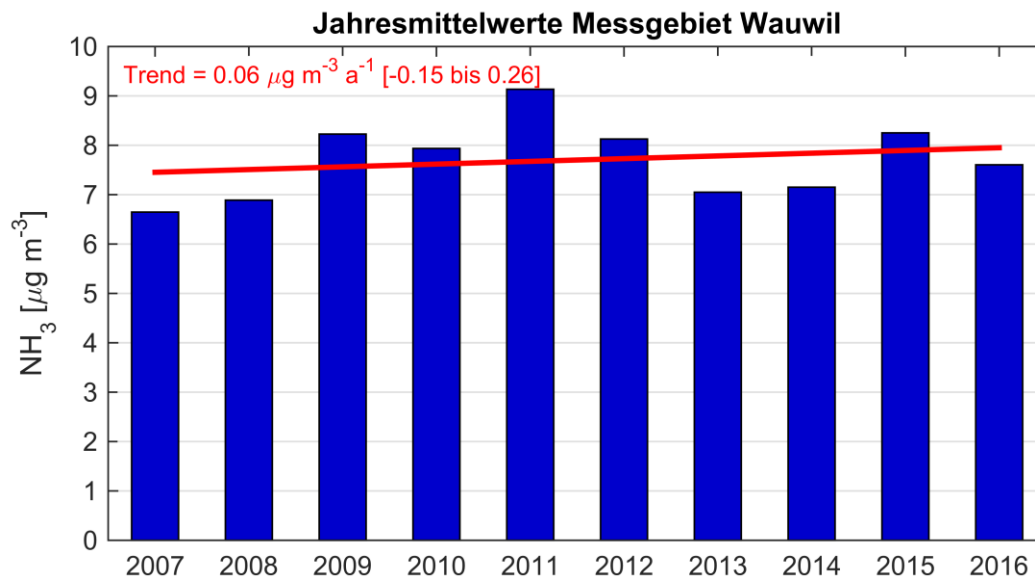


Abbildung 27: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Wauwil (verwendete Stationen zur Trendberechnung: WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19)

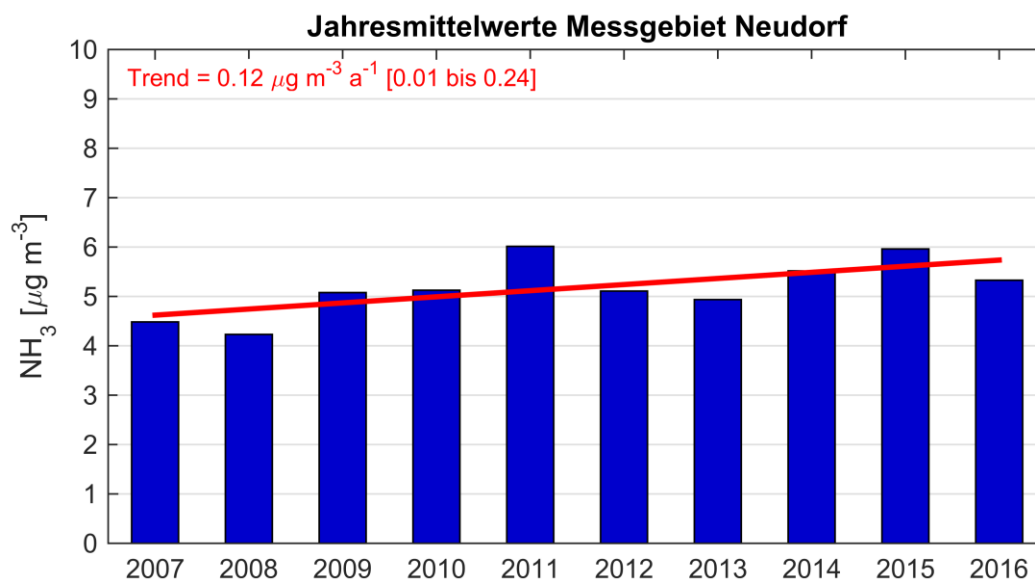


Abbildung 28: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Neudorf (verwendete Stationen zur Trendberechnung: NEU01, NEU02, NEU03)

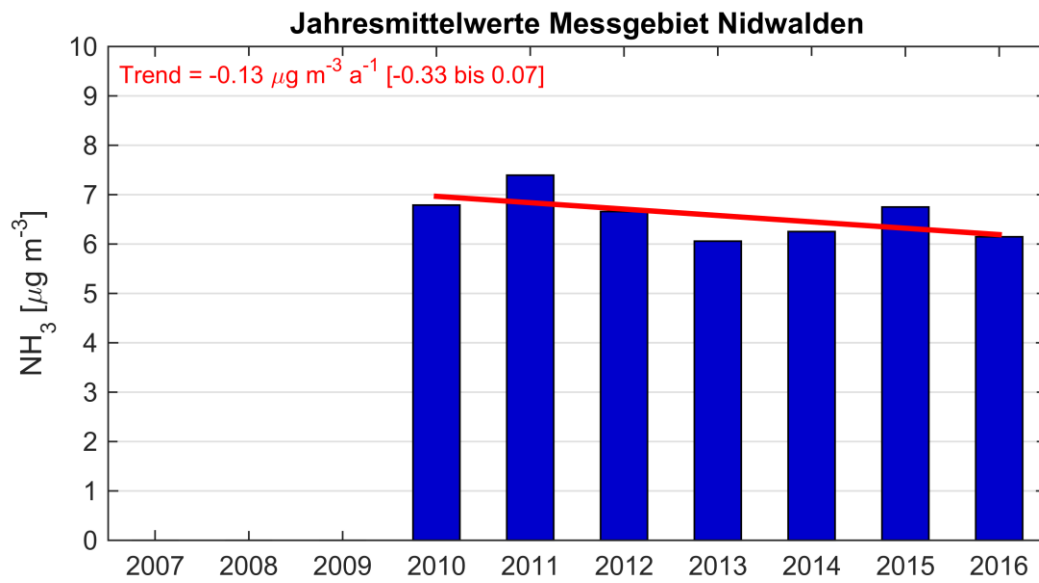


Abbildung 29: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Nidwalden (verwendete Stationen zur Trendberechnung: NW01, NW02, NW03)

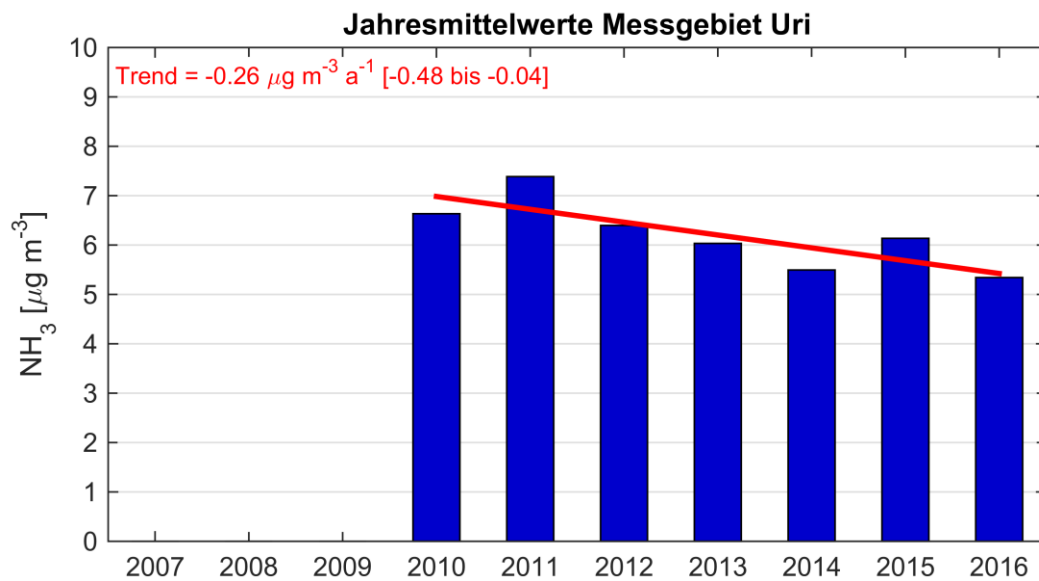


Abbildung 30: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Uri (verwendete Stationen zur Trendberechnung: UR01, UR02, UR03)

3.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkte

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 Nutzung:

- SCHU00: Futterbau, Rinder werden z. T. gesömmert
- ESC14: mehrheitlich Futterbau, teilweise Ackerbau
- UR02: Futterbau
- ZB01: Futterbau

Bei der Trendberechnung wurde jeweils ein Trend über die gesamte Messperiode am jeweiligen Messpunkt («Trend», graue Linie) und ein Trend seit 2010 berechnet («Trend_10», rote Linie). Abbildung 31 bis Abbildung 34 zeigen die Trendberechnungen für die vier ausgewählten Messpunkte, die Trendberechnung für sämtliche Messpunkte ist im Anhang Kapitel 5.4.2 zu finden.

Je nach Messpunkt führt das Jahresmittel 2016 den Trend des Verlaufes der Ammoniakkonzentration weiter wie bereits im Vorjahr:

- SCHU00: Seit Messbeginn statistisch signifikant zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.08 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). Der 2016-Wert ist etwas geringer als der Vorjahres-Wert.
- ESC14: Seit Messbeginn (2006) statistisch signifikant zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.31 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). Auch hier ist der 2016-er Wert geringer als der Wert im Vorjahr. Dementsprechend zeigt sich auch kein statistisch signifikanter zunehmender Trend seit 2010.
- UR02: Seit Messbeginn (2010) statistisch signifikant abnehmende Ammoniakkonzentration ($-0.45 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). Der 2016-Wert ist der tiefste seit Messbeginn.
- ZB01: Über beide Zeitperioden ist kein signifikanter Trend feststellbar.

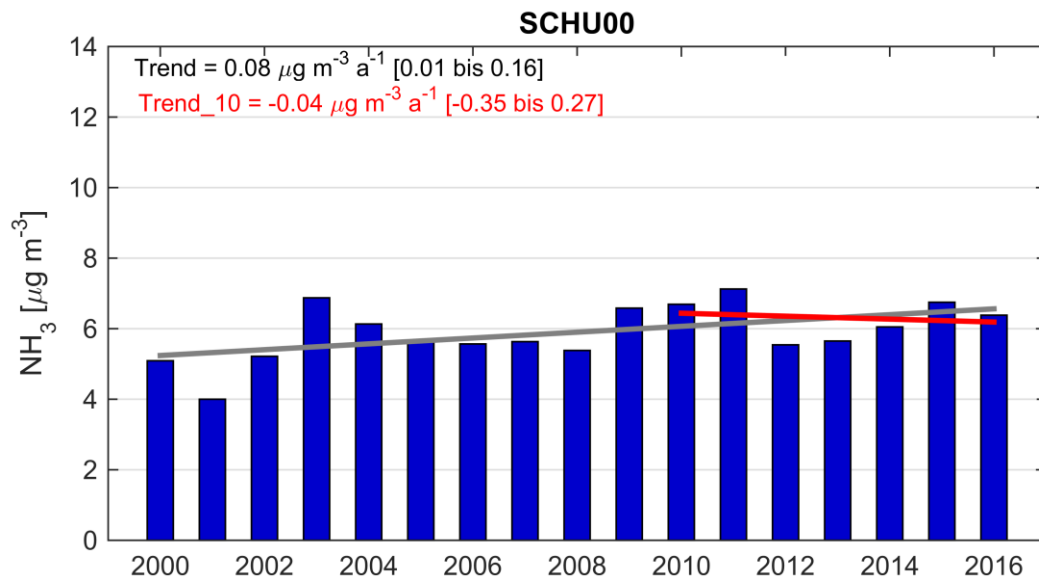


Abbildung 31: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt SCHU00. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

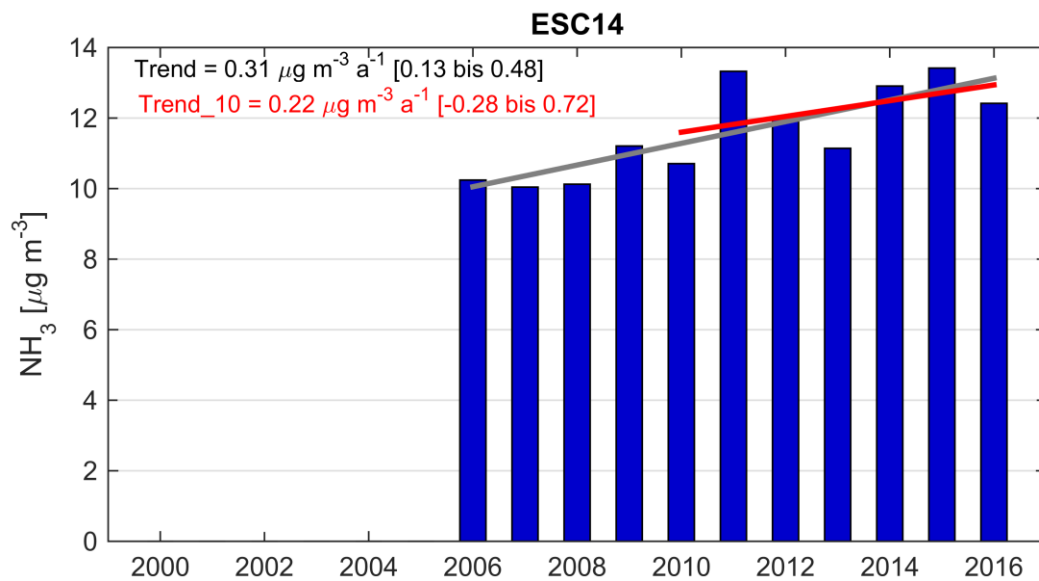


Abbildung 32: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ESC14. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

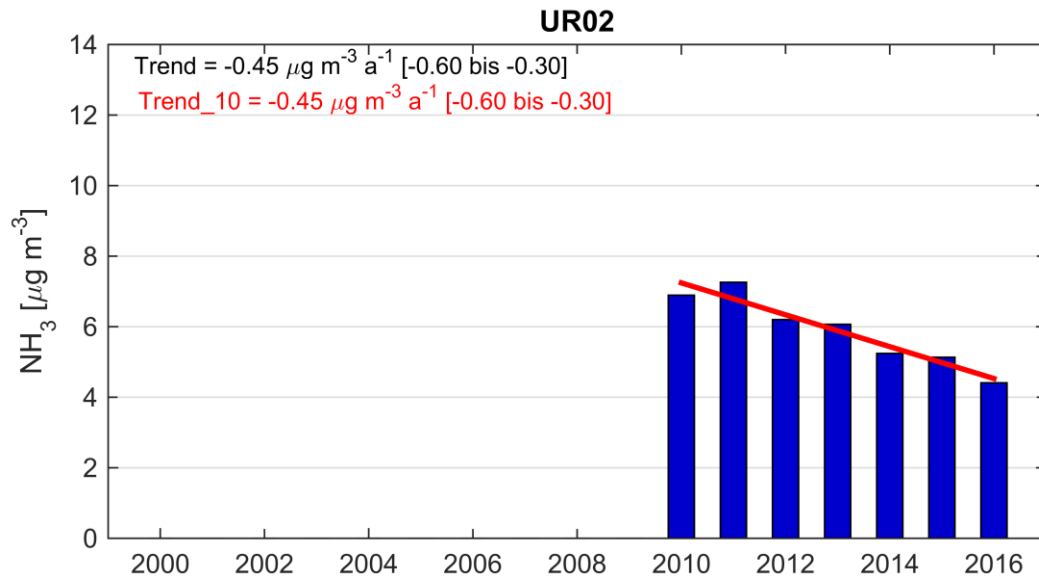


Abbildung 33: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt UR02. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

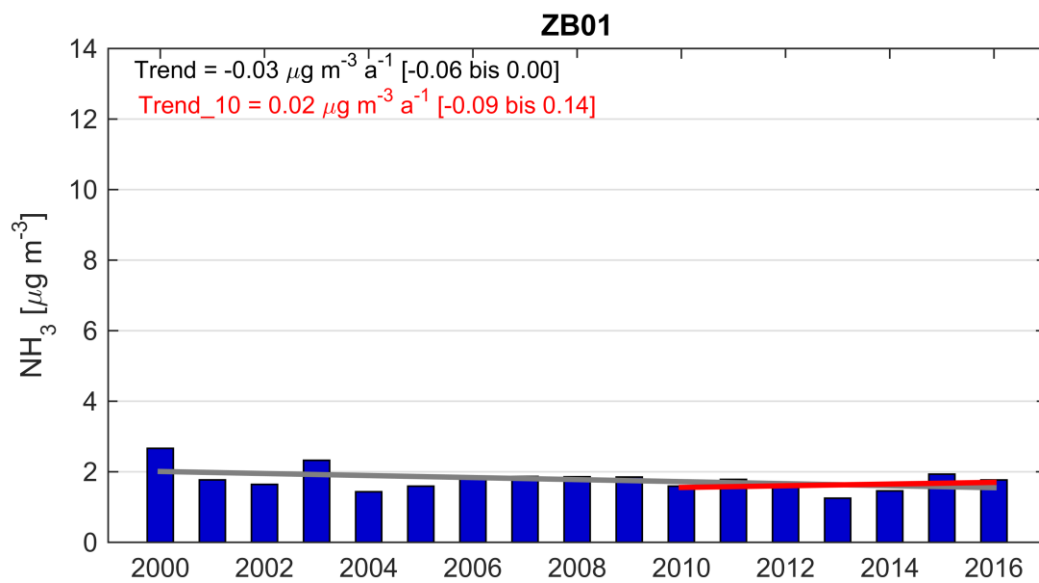


Abbildung 34: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ZB01. In Grau ist der Trend über alle Jahre der Messperiode dargestellt, in Rot der Trend seit 2010.

3.3 Stickstofffrachten durch Ammoniak

Zusätzlich zu den *Critical Levels* wurden zur Beurteilung von Stickstoffmengen auch *Critical Loads* eingeführt. *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*³¹ 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] ist das Produkt aus der Depositionsgeschwindigkeit V_{dep} von Ammoniak, der Ammoniakkonzentration und des N-Gehalts N von NH₃.³²

$$F = V_{\text{dep},i} * c_i * N_i \quad (1)$$

Die Stickstoff-Deposition F kann somit vereinfacht über die Ammoniakkonzentration c_{NH_3} , Expositionsdauer d_{exp} und Depositionsgeschwindigkeit V_{dep} abgeschätzt werden. 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.³³ 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 wird von einer tieferen Depositionsgeschwindigkeit von 10-20 mm s⁻¹ ausgegangen.

Im vorliegenden Bericht wurden gemäss oben erklärter Formel (1) die N-Deposition pro Jahr an ausgewählten Messpunkten berechnet (Tabelle 2). Die berechneten N-Depositionen, die aus dem Ammoniak entstehen, liegen je nach Standorteigenschaften zwischen 10 kg N a⁻¹ (ZB01, 2013) und 71 kg N a⁻¹ (ZG, 2011). Über alle Jahre ist die N-Deposition an allen Messpunkten hoch geblieben.

Vergleicht man die Stickstoffdepositionen der Tabelle 2 mit den *Critical Loads* (siehe Kapitel 1.1), wird ersichtlich, dass diese sehr deutlich 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 ist ausschliesslich der Stickstoffeintrag durch Ammoniak berücksichtigt. Die Anteile der Stickstoffdeposition, welche durch im Niederschlag gelöstes Ammonium und Nitrat sowie durch das Auskämmen von Ammoniumnitrat- und Ammoniumsulfat-haltigem Feinstaub verursacht werden, sind

³¹ UNECE (2007): Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts. ECE/EB.Air/WG.5/2007/3

³² Bucher, P. (2010): Ammoniak-Messbericht, Ammoniak-Messnetz Kanton Luzern, Ergebnisse 2000 bis 2009, uwe Luzern

³³ 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.

nicht berücksichtigt. Diese tragen etwa einen Viertel zur Gesamtfracht von Stickstoff bei.³⁴ Das dort enthaltene Ammonium stammt ursächlich auch von Ammoniak, wird aber deutlich weiträumiger verfrachtet.

Tabelle 2: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak in kg N pro Jahr an fünf verschiedenen Messpunkten sowie den ZUDK-Messgebieten des Ressourcenprogramms. Als Depositionsgeschwindigkeit wurde bei allen Berechnungen $V_{\text{dep}}=30 \text{ mm s}^{-1}$ für Nadelwald angenommen. Für Moore wäre mit $V_{\text{dep}}=20 \text{ mm s}^{-1}$ oder mit 33 % tieferen Frachten zu rechnen.

Station	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
WAU16.4	42.8	38.5	36.4	50.0	51.2	56.9	48.0	39.8	42.4	46.6	42.4
ESC08	67.8	60.0	56.7	58.4	59.0	69.0	55.5	51.1	69.2	67.6	63.3
SCHÜ00	43.3	43.8	41.9	51.2	52.0	55.4	43.1	43.9	47.0	52.9	49.6
HOL01	44.0	44.1	45.1	50.5	45.2	52.0	44.6	45.2	48.5	48.2	42.3
ZB01	14.3	14.5	14.4	14.4	12.4	13.9	12.5	9.7	11.3	14.8	13.7
NW	-	-	-	-	52.8	57.5	51.8	47.1	48.6	52.6	47.8
OW ³⁵	-	-	-	-	56.4	64.8	51.5	50.8	47.2	55.4	52.4
SZ	-	-	-	-	37.1	55.7	41.2	28.3	29.5	40.9	40.6
UR	-	-	-	-	51.6	57.4	49.7	46.9	42.7	47.7	41.5
ZG ³⁶	-	-	-	-	62.8	70.6	60.9	49.4	60.7	58.7	50.9

Die hier berechneten N-Depositionen durch Ammoniak sind vergleichbar mit jenen, welche mit einfachen, passiven Methoden in dem BAFU-Projekt bestimmt wurden. Letztere zeigen auch, dass schon allein durch den Ammonium-Stickstoff im Niederschlag, ohne Nitrat, Gase und Aerosole, an einigen Standorten die *Critical Loads* überschritten werden.³⁴

Abbildung 35 zeigt die Werte von Tabelle 2 in Bezug auf das Jahr 2010 (2010 entspricht 100 %) sowie einen berechneten Mittelwert über alle ausgewählte Stationen seit 2010. Mit dieser Darstellung wird ersichtlich, dass die Ammoniak-Belastung im Jahr 2011 eher hoch war, wohingegen die Jahre 2012 bis 2014 relativ gesehen eine eher geringere Ammoniak-Belastung aufweisen. Diverse Standorte zeigen im Vergleich zum Referenzjahr 2010 im Jahr 2016 eine geringere Ammoniakbelastung. Allerdings gibt es auch Messpunkte, bei welchen eine höhere Ammoniakbelastung auftritt. Die sehr hoch berechnete N-Deposition in Schwyz im Jahr 2011 wird von einem einzelnen Messpunkt beeinflusst.

³⁴ Seitler et al. (2016): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 105 S.

³⁵ 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.

³⁶ 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.

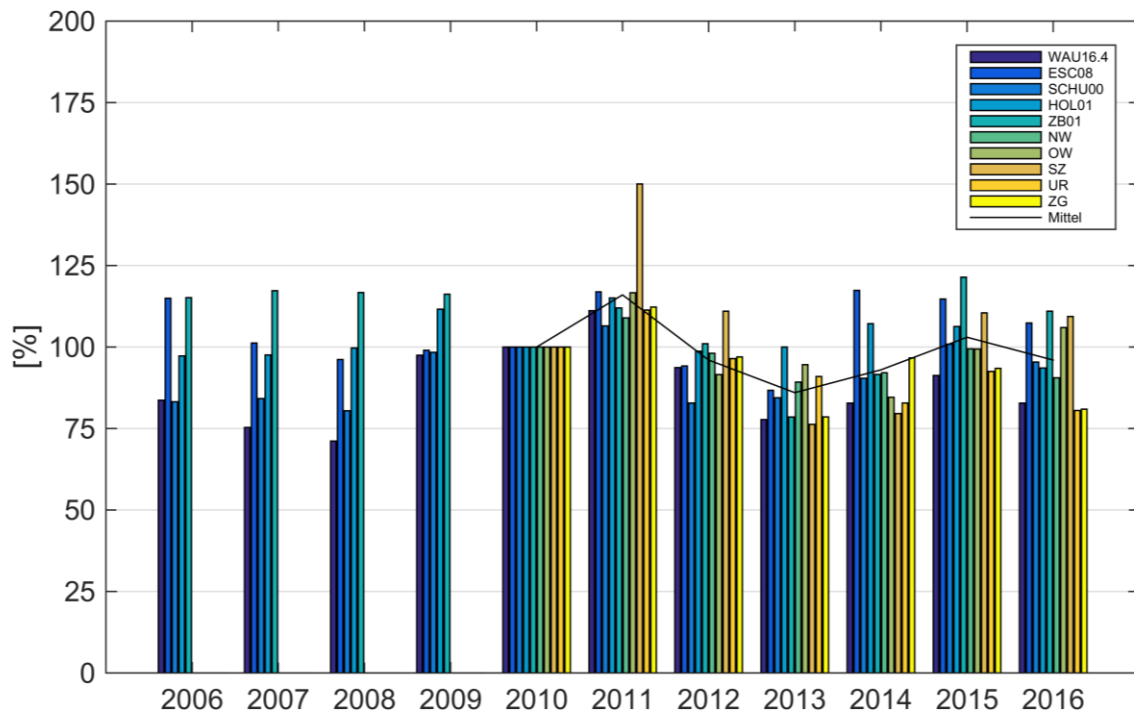


Abbildung 35: Berechnete N-Deposition durch Ammoniak an fünf Messpunkten und in den fünf Ressourcenprojekt-Messgebieten Zentralschweiz in Bezug auf das Jahr 2010 (2010 = 100 %) sowie das Mittel der ausgewählten Messpunkte und -gebiete seit 2010 (schwarze Linie).

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. Ausserdem bestehen verschiedene Stickstoffsinken: Stickstoff wird in die Pflanzenmasse eingebaut und Nitrat wird ins Grundwasser ausgewaschen. Bei vernässten Böden findet eine Umwandlung von Stickstoffverbindungen in 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 zu erkennen. Die fortlaufende Aufsummierung hat zur Folge, dass kurzzeitige Schwankungen geglättet werden. Bleibt an einem Standort die Konzentration konstant, resultiert eine konstant 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 5.5 zu finden.

Abbildung 36 zeigt die Frachtdiagramme von fünf ausgewählten Messpunkten. Startpunkt ist das Jahr 2006. Bei den fünf Messpunkte WAU16.4, ESC08, SCHU00, RO und ZB01 weichen die Frachtkurven kaum von einer Geraden ab, was als gleichbleibender Stickstoffeintrag zu interpretieren ist. Je steiler die Gerade, umso höher die Belastung. Als Lesehilfe ist in Abbildung 36 jeweils als gestrichelte Linie die lineare Regressionsfunktion dargestellt, sowie in Zahlen die mittlere N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr.

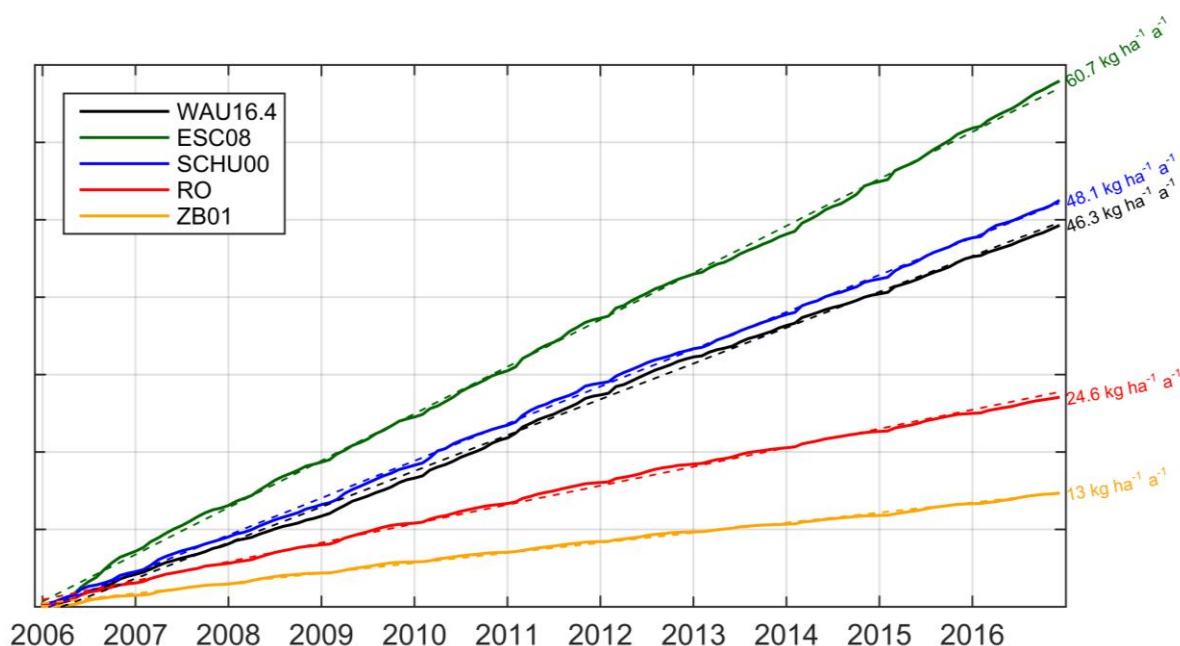


Abbildung 36: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Depositionen seit Januar 2006 bis Dezember 2016 an fünf verschiedenen Messpunkten in der Zentralschweiz. Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion, die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittlere N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr, berechnet aus der linearen Regressionsfunktion.

Abbildung 37 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. Bei den Messgebieten Zug und Uri ist eine Abweichung von der Gerade erkennbar. Die Kurven biegen sich leicht zeitweise nach oben oder unten. Bei einer nach unten gekrümmten Kurve nimmt die Belastung ab, bei einer nach oben gekrümmten Kurve zu. Dennoch ist eine gute Übereinstimmung der Frachtberechnung und der linearen Regression erkennbar. Daraus kann geschlossen werden, dass die Abnahmen und Zunahmen der berechneten N-Depositionen noch zu klein sind, um sich deutlich von einer linearen Regression zu unterscheiden.

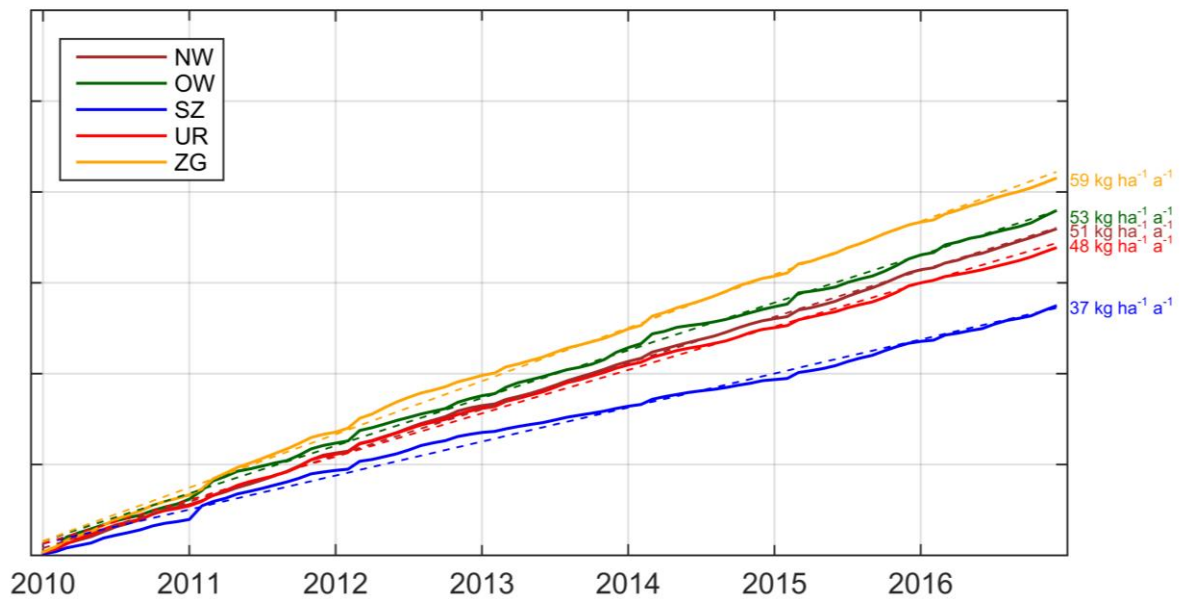


Abbildung 37: Aus gemessenen Ammoniakkonzentrationen berechnete und aufsummierte N-Deposition aller Ressourcenprojekt-Standorte der ZUDK (Ressourcenprojekt-Messpunkte seit 2010). Die gestrichelten Kurven entsprechen der linearen Regressionsfunktion. Die Zahlen am rechten Bildrand stehen für die mittleren N-Deposition durch Ammoniak pro Jahr, berechnet aus der linearen Funktion.

3.4 Einfluss der Meteorologie auf NH₃-Trends

Die Ammoniakkonzentrationen werden stark von der Meteorologie beeinflusst. Im Gegensatz zum Vorjahr sind die Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2016 allgemein wieder etwas geringer ausgefallen. Hier könnten die Witterungsverhältnisse eine wichtige Rolle gespielt haben: Gegenüber dem Durchschnittswert von 1981-2010 erreichte die Jahrestemperatur 2016 einen Überschuss von 0.7 Grad, was deutlich weniger ist als im Jahr 2015. Die Jahresmengen des Niederschlags erreichten auf der Alpennordseite zwischen 90 und 120 Prozent der Norm 1981-2010, lokal wurde auch 120 bis 130 Prozent erreicht (Abbildung 38). Auch hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zum Jahr 2015, welches sehr niederschlagsarm war. Dieses niederschlagsreiche Wetter im Jahr 2016 trug wesentlich dazu bei, dass das Ammoniak nicht lange in der Luft verweilen konnte und somit tiefe Immissionswerte erhoben wurden.

Hinsichtlich der Ammoniakkonzentrationen war im Jahr 2016 insbesondere der geringere «Peak» im Frühling 2016 auffallend. Das Jahr 2016 startete mit einer rekordnahen Winterwärme. Der Januar 2016 war auf der Alpennordseite ausserdem ausgesprochen niederschlagsreich. Der Frühling lieferte weiter verbreitet Niederschlag, nur der März war eher niederschlagsarm. Auch der Juni war überwiegend trüb und regnerisch, so dass das erste Halbjahr 2016 auf der Alpennordseite regional mit den höchsten Niederschlagssummen seit Messbeginn 1864 endete. Im Juli kam endlich etwas Sommer, ab Ende August setzte sich dann anhaltendes Hochdruckwetter durch, welches bis Mitte September anhielt. Die ungewöhnliche Spätsommerwärme endete dann mit einem zu kalten Oktober. Und auch die erste Monatshälfte im November war winterlich kalt. Dies änderte dann im Dezember – durch beständiges Hochdruckwetter wurde der niederschlagsärmste Dezember seit 1864 registriert.³⁷

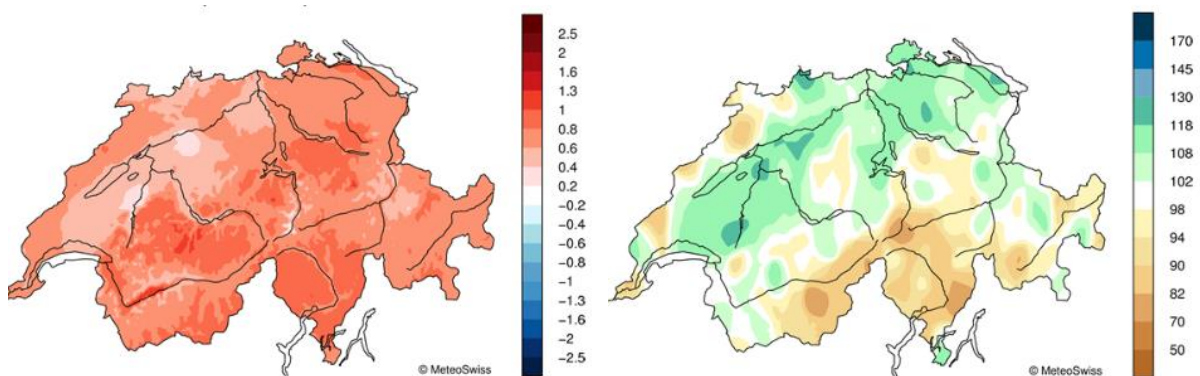


Abbildung 38: Links: Abweichung der Jahresmitteltemperatur 2016 von der Norm in °C (1981-2010). Rechts: Jahres-Niederschlagssumme in Prozent der Norm (1981-2010). Von MeteoSchweiz³⁷

³⁷ MeteoSchweiz (2017): Klimabulletin Jahr 2016, Zürich

4 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Ammoniak wird überwiegend aus der Landwirtschaft emittiert, vor allem beim Ausbringen und Lagern von Gülle und Mist sowie im Stall und Laufhof. Diese Emissionen können Ökosysteme schädigen. Seit 2000 werden deshalb im Kanton Luzern und auf dem Zugerberg im Kanton Zug die Ammoniak-Immissionen mit Passivsammlern gemessen. Im 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 zusätzlich in Ausserschwyz an einem Messpunkt die Ammoniakkonzentration erhoben. Das gesamte Messnetz dient als Grundlage für die Erstellung und Überwachung der **Lufthygiene-Massnahmenpläne** Ammoniak der Kantone Luzern und Zug sowie als **Wirkungsmonitoring** für den Erfolg der Ressourcen-Programme zur Ammoniakminderung, welche im Jahr 2014 (Kanton Luzern, Ressourcenprojekt Stickstoff) respektive 2015 (übrige Zentralschweizer Kantone, Ressourcenprojekt Ammoniak) ausgelaufen sind. Obwohl die Messgebiete teils in Landwirtschaftszonen liegen, hat es in deren näheren Umgebung ökologisch sensitive Gebiete.

Die Ammoniakimmissionen zeigen im Jahresgang eine deutliche **Saisonalität**, die in Regionen mit intensiver Tierhaltung stärker ausgeprägt ist. Die Ammoniakkonzentrationen **überschreiten im mehrjährigen Mittel (2010-2016) den Critical Level von $3 \mu\text{g m}^{-3}$ zum Teil sehr deutlich** und über alle Messgebiete gerechnet mit dem 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 (Faktor 1.7)**.

Die **langjährigen Messreihen** (Messdaten seit mindestens 2007) **zeigen an den einzelnen Messpunkten eher zunehmende oder gleichbleibende Ammoniakkonzentrationen**. Dabei ist die Trendberechnung bei zwei Standorten statistisch signifikant zunehmend (SCHU00, ESC14).

In den definierten **Messgebieten im Kanton Luzern mit Messungen seit 2007** zeigt sich an **vier Orten eine Zunahme und in einem Messgebiet eine Abnahme der Ammoniakkonzentration**. Die einzige statistisch signifikante Veränderung verzeichnet das Messgebiet Neudorf ($+0.12 \mu\text{g m}^{-3} \text{a}^{-1}$). Die kantonalen Messpunkte in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen im Kanton Zug mit Messungen seit 2007 zeigen gleichbleibende Ammoniakkonzentrationen.

Die Messgebiete des Zentralschweizer Ressourcenprojekts mit Daten ab 2010 zeigen rückläufige Tendenzen. Dabei zeigt aber einzig das Messgebiet Uri eine statistisch signifikante Abnahme der Ammoniakkonzentration. **Messpunkte mit Messbeginn 2010 zeigen eher abnehmende Ammoniakkonzentration.**

Von der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL) wird es als nicht zielführend erachtet, Grenzwerte für Ammoniak in der LRV aufzunehmen. Es wird stattdessen empfohlen, sich an den **Critical Loads** und **Critical Levels** der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) zu orientieren. Ausgewählte Standorte zeigen, dass die N-Deposition in der Zentralschweiz die **Critical Loads deutlich überschreitet**.

Der **Einfluss der Meteorologie** auf die Ammoniakkonzentrationen ist im Jahresvergleich **gross**. Das niederschlagsreiche Wetter im Jahr 2016 führte dazu, dass der Frühlingspeak der Ammoniakkonzentration deutlich geringer ausfiel als in den Vorjahren.

Die **uneinheitlichen Trends** je nach Messstandort und Beginn der Trendanalyse zeigen die Notwendigkeit, die **Messungen an möglichst vielen Standorten über mehrere Jahre weiterzuführen**, um robuste Aussagen über den Erfolg der Massnahmenpläne Ammoniak machen zu können. Wichtig ist, dass das **Monitoring** nicht nur an exponierten landwirtschaftlichen Standorten erfolgt, sondern auch **ökologisch sensitive Standorte** untersucht werden. Beispiele dafür sind die Hochmoore Rothenthurm und Sörenberg als zwei Standorte, welche Teil der Stickstoffdepositionsmessungen des BAFU waren, sowie subalpine Naturwiesen und Schutzwälder. Gerade an solchen Standorten verursacht ein übermässiger Stickstoffeintrag Verluste der Biodiversität und Schäden an Wäldern und folglich erhöhte Risiken für Naturgefahren.

5 Anhang

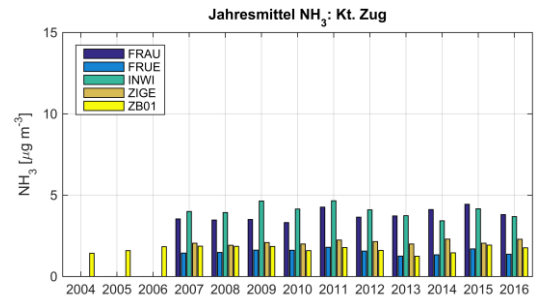
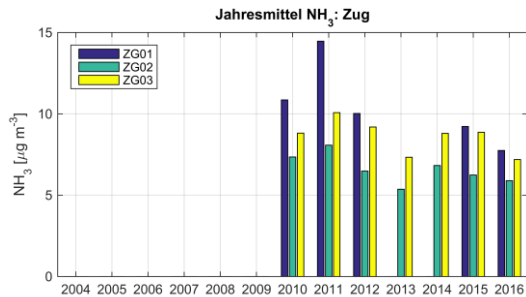
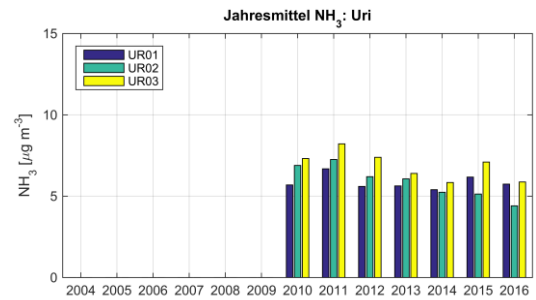
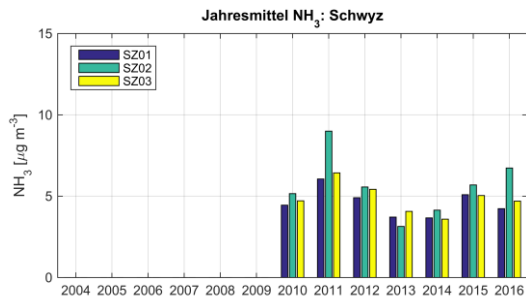
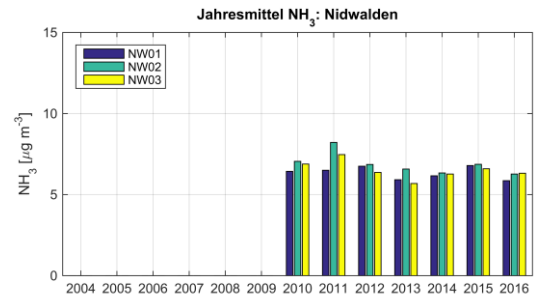
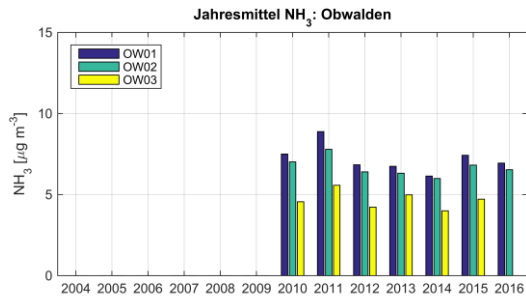
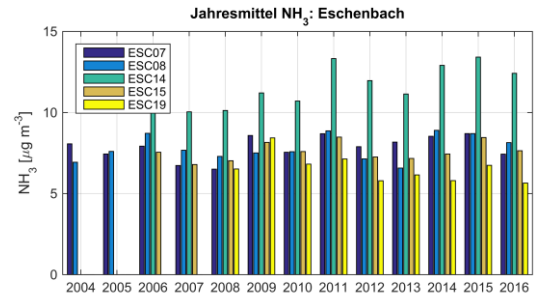
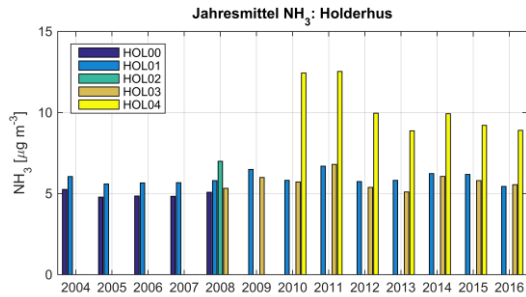
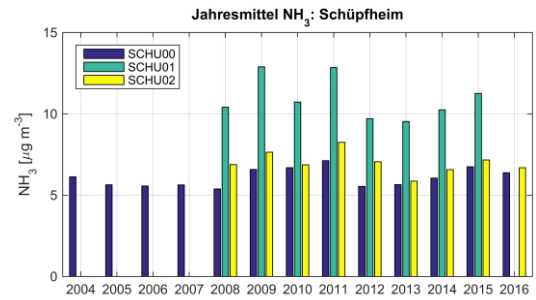
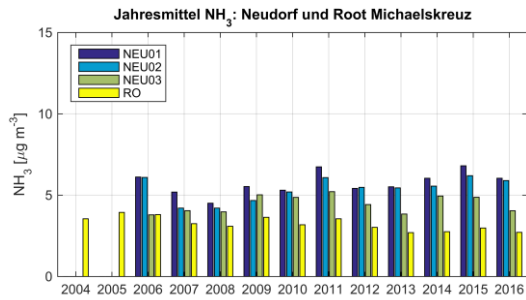
5.1 Charakterisierung der Messpunkte

Tabelle 3: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte

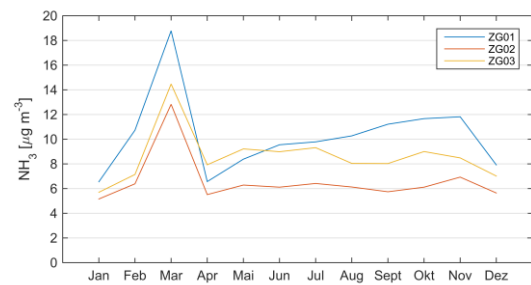
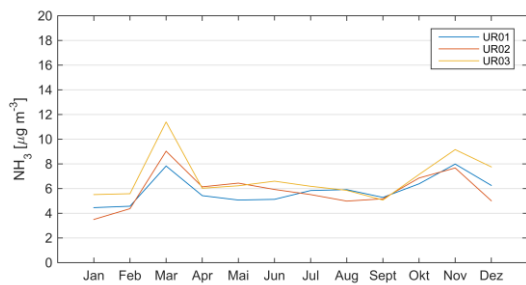
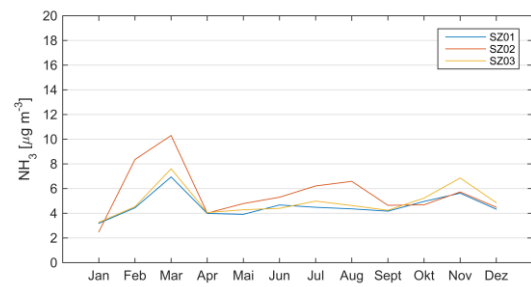
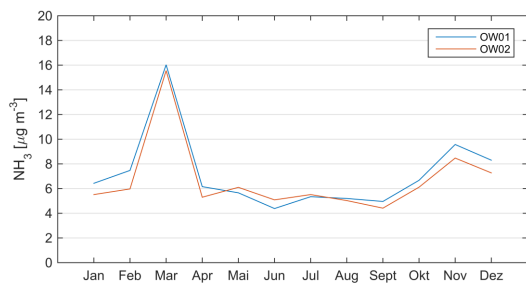
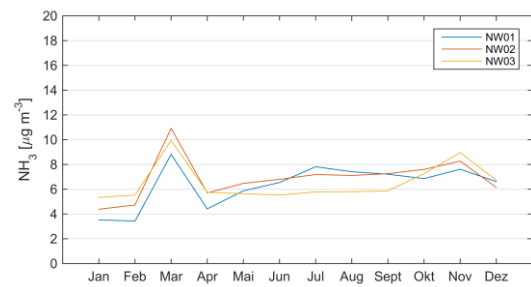
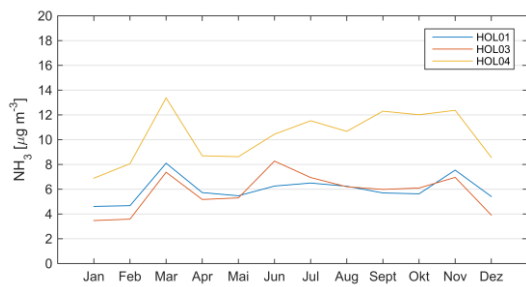
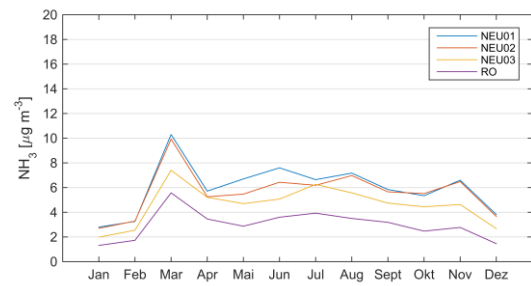
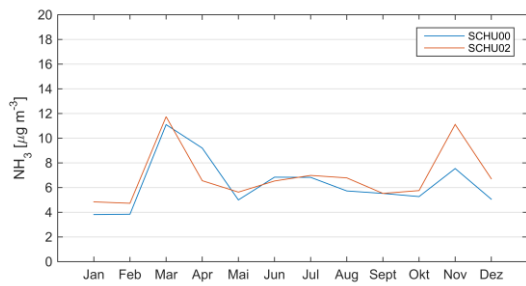
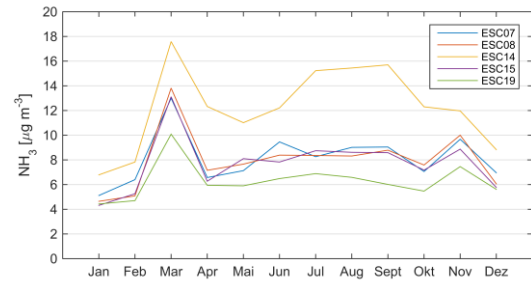
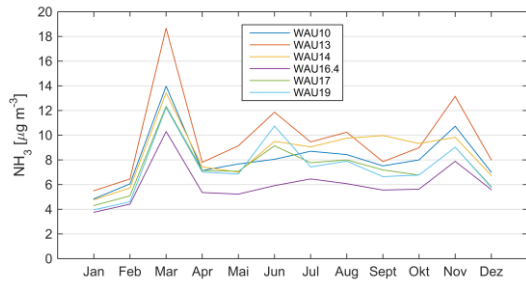
Standort- abkürzung	Standort	E-Koord.	N-Koord.	Jahresmittel	Jahresmittel	Jahresmittel	Jahresmittel	Jahresmittel	Jahresmittel
				2011 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	2012 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	2013 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	2014 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	2015 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	2016 [$\mu\text{g m}^{-3}$]
WAU10	Wauwil 10	644735	224950	9.2	8.4	7.4	7.3	8.8	7.5
WAU13	Wauwil 13	644669	224165	10.9	10.2	9.1	9.0	9.9	9.5
WAU14	Wauwil 14	643364	224124	9.9	8.9	7.4	7.6	9.5	8.5
WAU16.2	Wauwil 16.2	643707	224651	6.7	5.7	4.5	4.8	5.3	4.8
WAU16.4	Wauwil 16.4	643707	224651	7.3	6.2	5.1	5.5	6.0	5.5
WAU17	Wauwil 17	643451	225590	8.9	7.8	7.1	6.5	7.3	6.7
WAU19	Wauwil 19	644113	224324	8.6	7.2	6.2	7.1	8.0	8.0
NEU01	Neudorf 1	659290	224550	6.7	5.4	5.5	6.0	6.8	6.1
NEU02	Neudorf 2	659706	224499	6.1	5.5	5.5	5.6	6.2	5.9
NEU03	Neudorf 3	660470	224246	5.2	4.4	3.8	5.0	4.9	4.1
SCHÜ00	Schüpfheim 0	644727	201091	7.1	5.5	5.6	6.1	6.8	6.4
SCHÜ01	Schüpfheim 1	645021	201587	12.9	9.7	9.5	10.3	11.3	-
SCHÜ02	Schüpfheim 2	644537	201575	8.3	7.1	5.9	6.6	7.2	6.6
SCHÜ03	Schüpfheim 3	644883	201384	-	-	-	-	-	-
HOL01	Holderhus 1	657129	216962	6.7	5.7	5.8	6.2	6.2	5.5
HOL03	Holderhus 3	657229	216724	6.8	5.4	5.1	6.1	5.8	5.6
HOL04	Holderhus 4	657256	216902	12.5	10.0	8.9	9.9	9.2	8.9
RO	Root Michaelskreuz	673847	218489	3.6	3.0	2.7	2.8	3.0	2.7
ESC07	Eschenbach 7	665253	221074	8.7	7.9	8.2	8.5	8.7	7.4
ESC08	Eschenbach 8	665208	221946	8.9	7.1	6.6	8.9	8.7	8.2
ESC14	Eschenbach 14	663387	220976	13.3	12.0	11.1	12.9	13.4	12.5
ESC15	Eschenbach 15	664039	220788	8.5	7.3	7.2	7.4	8.5	7.7
ESC19	Eschenbach 19	664795	221169	7.1	5.8	6.2	5.8	6.7	5.7

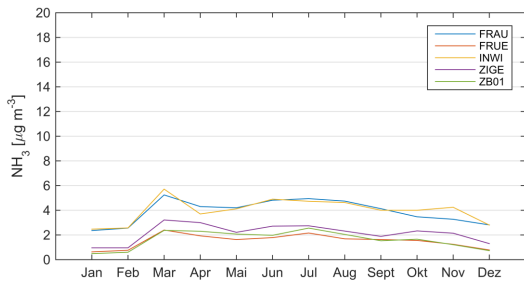
NW-01	Stans Galgenried Nord	669232	202160	6.5	6.8	5.9	6.2	6.8	5.9
NW-02	Stans Galgenried Süd	669272	201761	8.2	6.9	6.6	6.3	6.9	6.3
NW-03	Oberdorf Schiessstand	672375	200273	7.5	6.4	5.7	6.3	6.6	6.3
OW-01	Obwalden 1	664271	195471	8.9	6.9	6.7	6.1	7.4	7.0
OW-02	Obwalden 2	664518	195592	7.8	6.4	6.3	6.0	6.8	6.6
OW-03	Obwalden 3	664798	195978	5.6	4.2	5.0	4.0	4.7	-
OW-04	Obwalden 4	664301	196174	-	-	-	-	-	-
SZ-01	Bauschli	692420	207555	6.1	4.9	3.7	3.7	5.1	4.2
SZ-02	Tändlen	692890	207272	9.0	5.6	3.1	4.1	5.7	6.8
SZ-03	Rossmattli	692550	207040	6.4	5.4	4.1	3.6	5.0	4.7
UR-01	Uri 1	691655	188171	6.7	5.6	5.6	5.4	6.2	5.8
UR-02	Uri 2	691718	188555	7.3	6.2	6.1	5.2	5.1	4.4
UR-03	Uri 3	691372	189215	8.2	7.4	6.4	5.8	7.1	5.9
ZG-01	Niederwil 1	676343	229868	14.5	10.0	-	-	9.2	7.8
ZG-02	Niederwil 2	676164	229277	8.1	6.5	5.4	6.8	6.2	5.9
ZG-03	Niederwil 3	675708	229387	10.1	9.2	7.3	8.8	8.9	7.2
FRAU	Kloster Frauental	674546	229562	4.3	3.7	3.7	4.1	4.4	3.8
FRUE	Früebüel	683423	218884	1.8	1.6	1.3	1.3	1.7	1.4
INWI	Inwil	682567	226900	4.7	4.1	3.7	3.4	4.2	3.7
ZIGE	Zigerhüttli	691689	220849	2.2	2.2	2.0	2.3	2.1	2.3
ZB01	Zugerberg 1	683000	220500	1.8	1.6	1.3	1.5	1.9	1.8
RIG	Rigi Seebodenalp	677845	213462	1.5	1.3	1.3	1.3	1.6	1.2
WAN01	Wangen 01	709749	227700	-	-	-	-	-	8.2

5.2 Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen nach Messgebieten



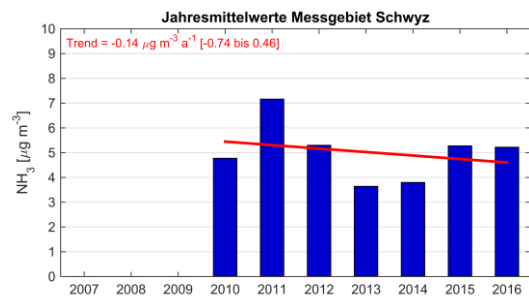
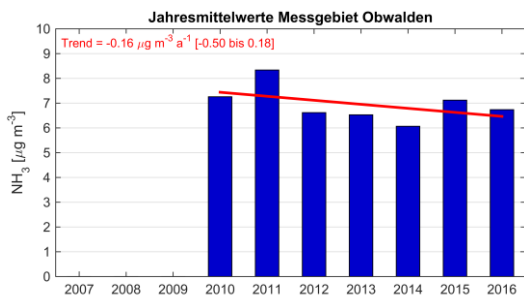
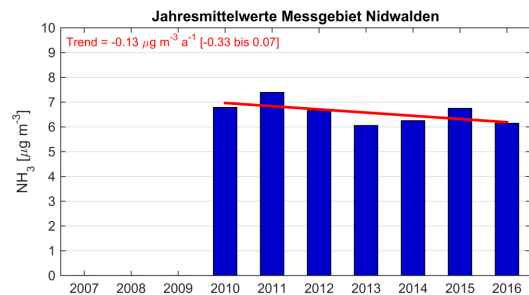
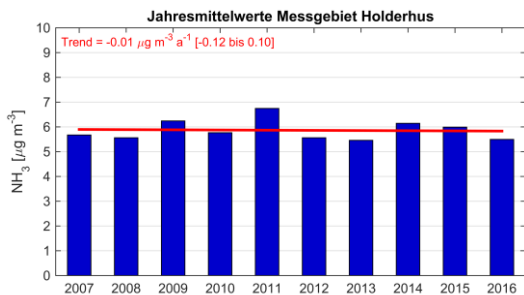
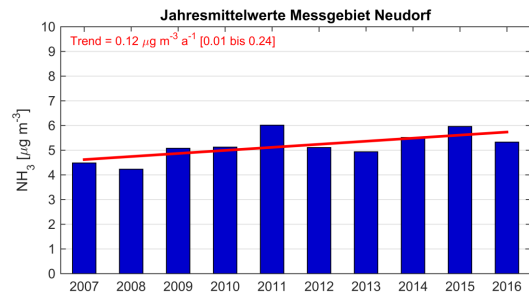
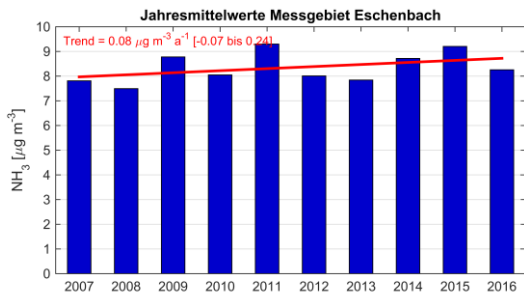
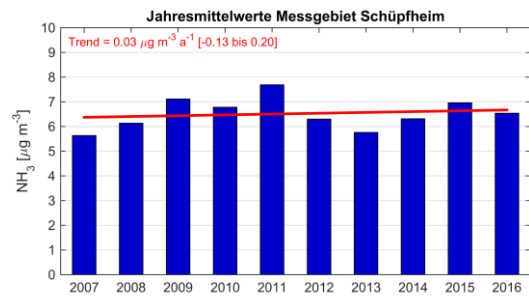
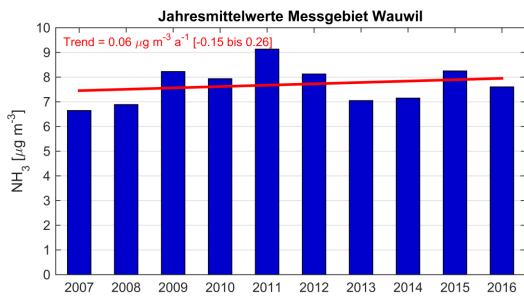
5.3 Jahresgang der Ammoniakkonzentration nach Messgebieten (Mittelung 2010 - 2016)

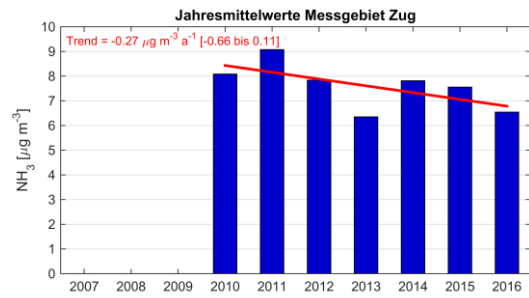
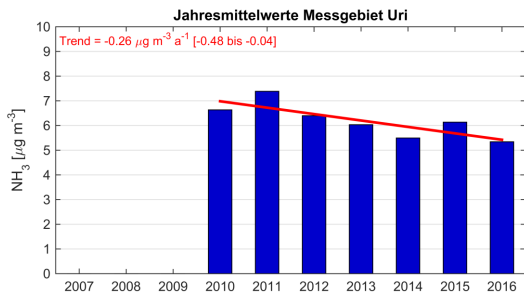




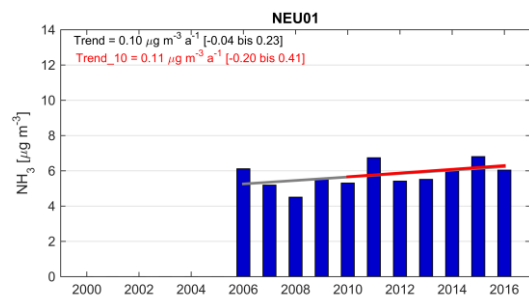
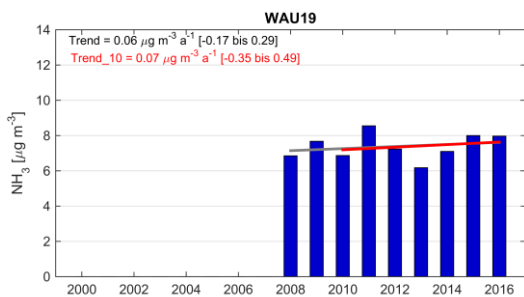
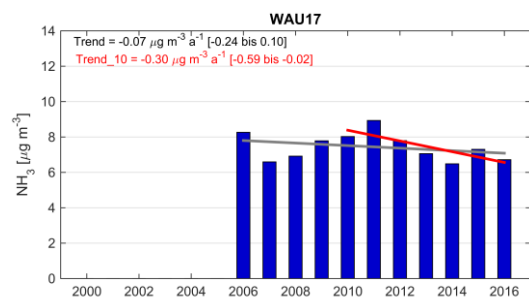
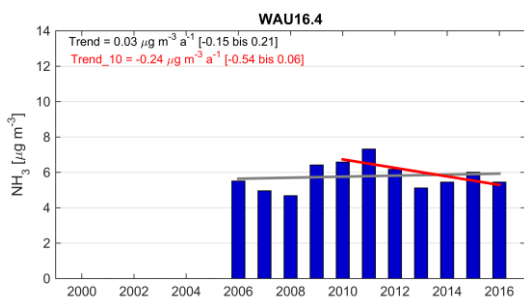
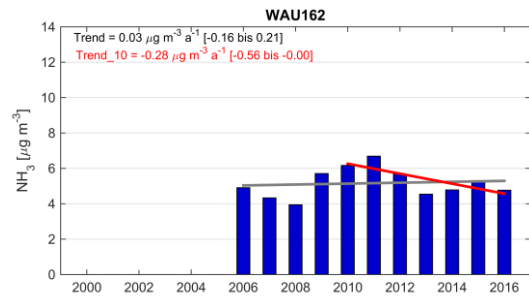
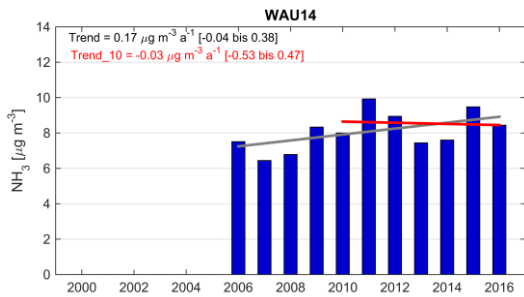
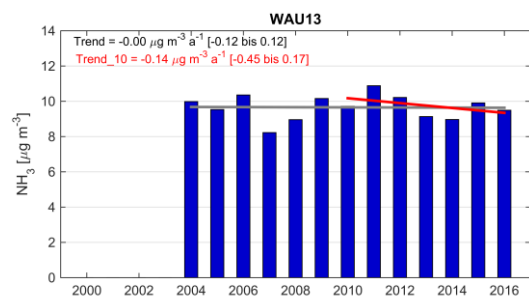
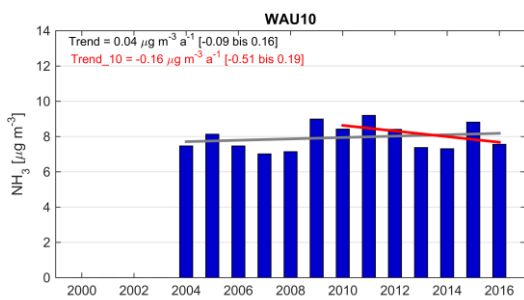
5.4 Trendberechnungen

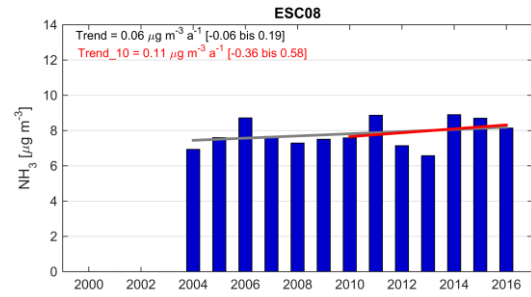
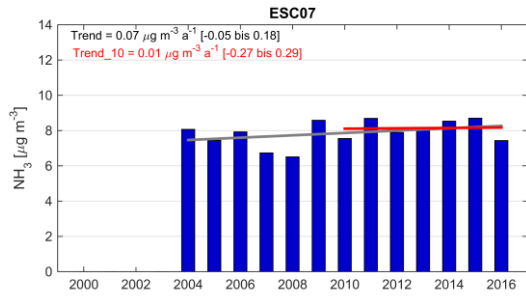
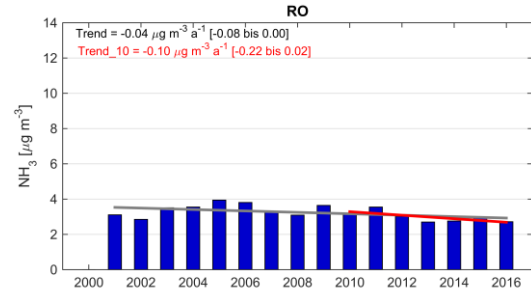
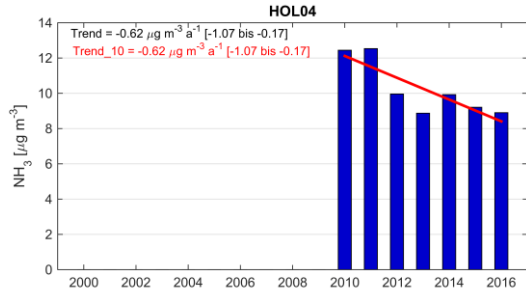
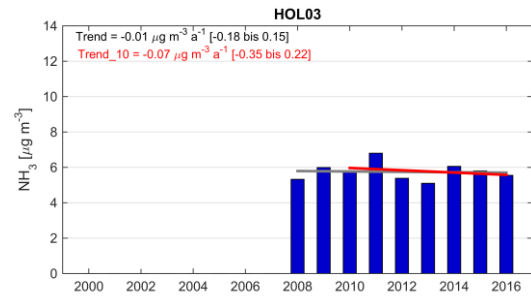
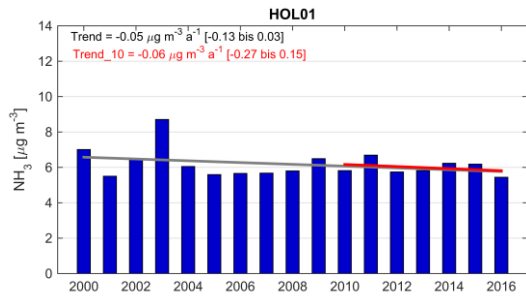
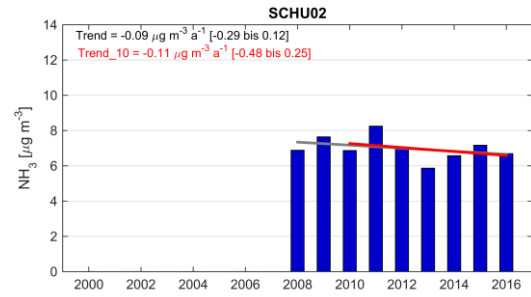
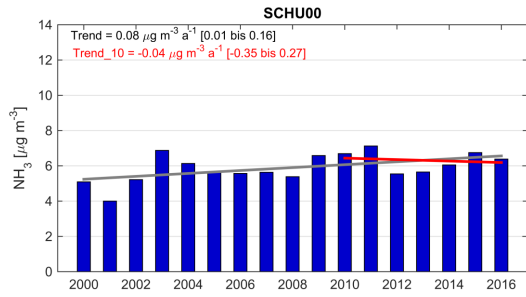
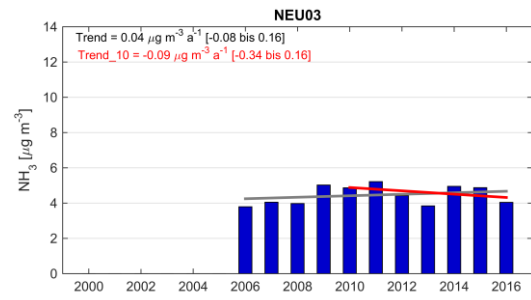
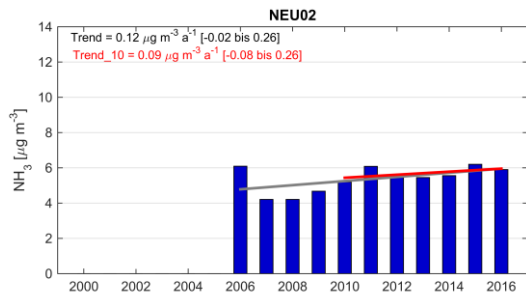
5.4.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

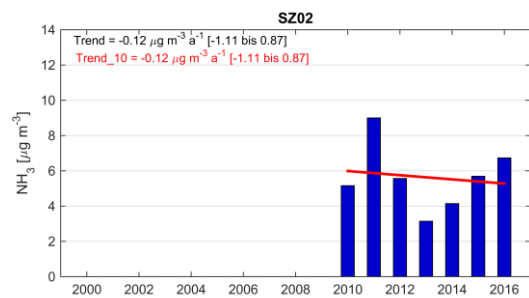
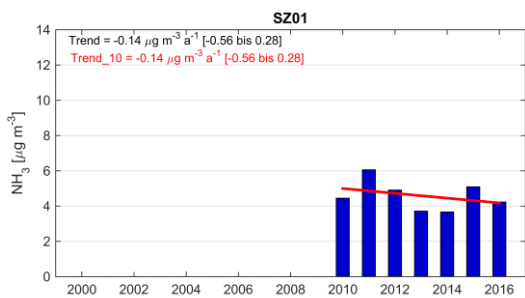
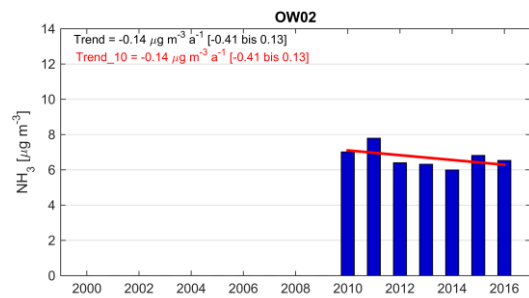
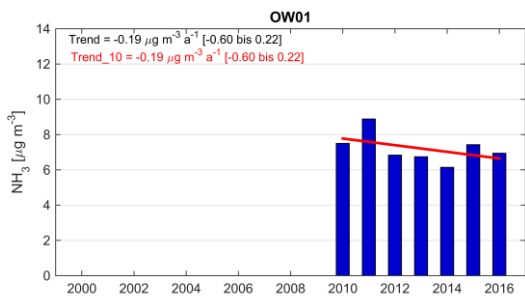
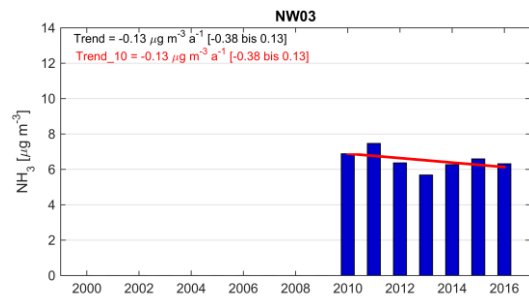
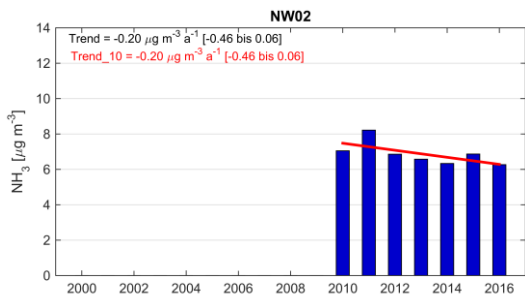
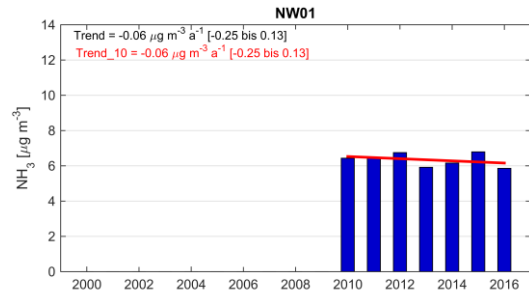
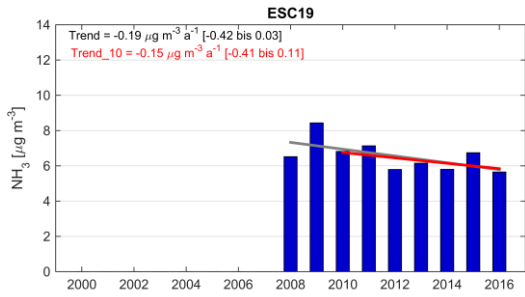
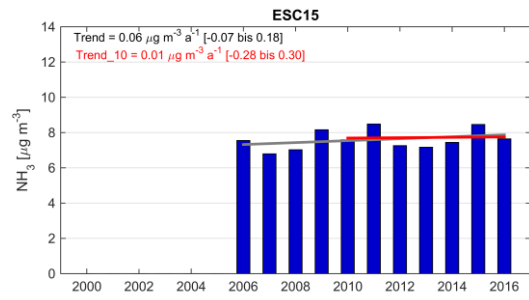
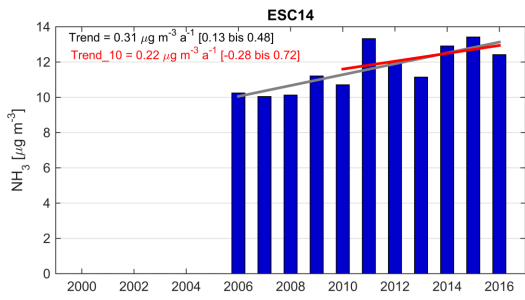


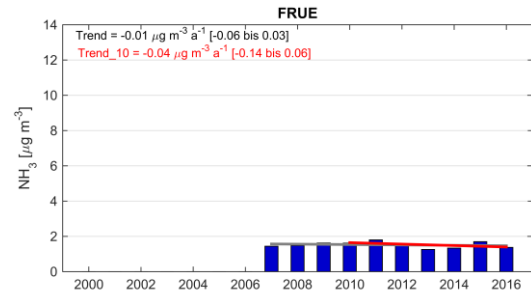
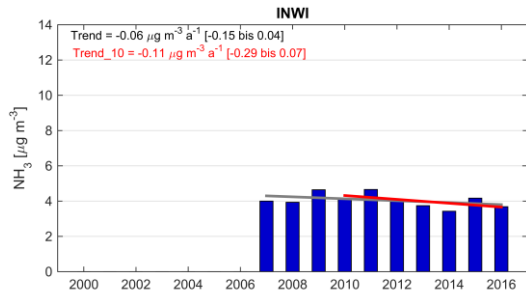
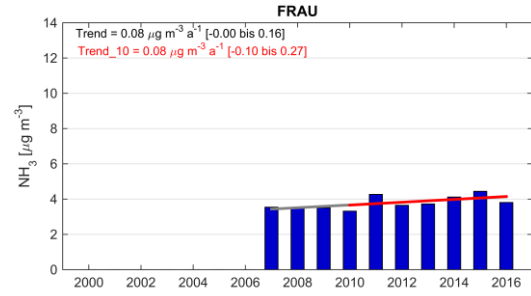
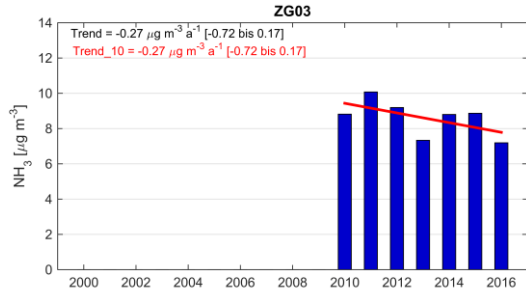
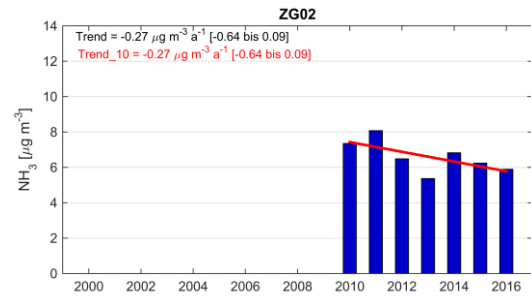
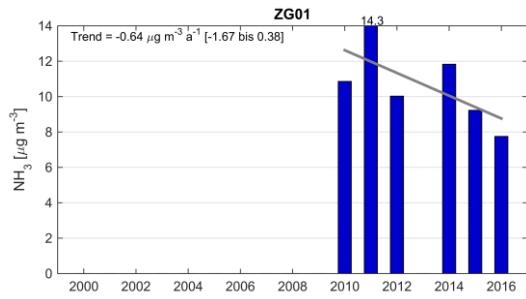
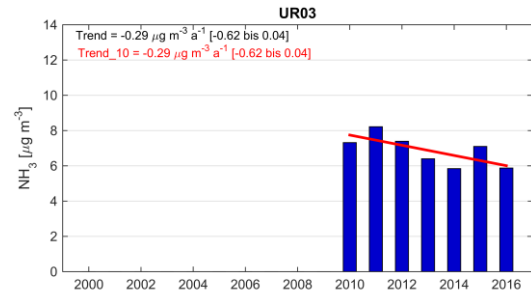
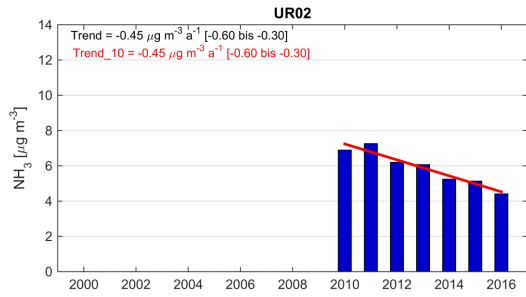
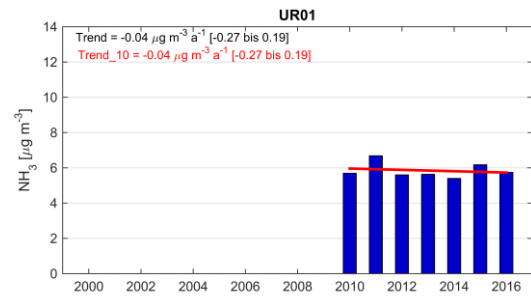
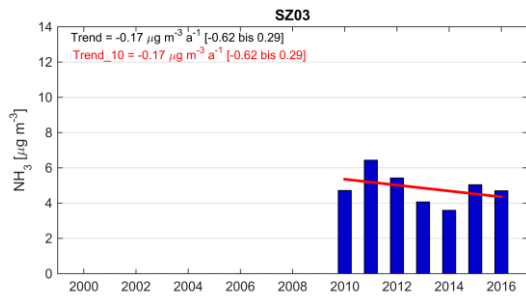


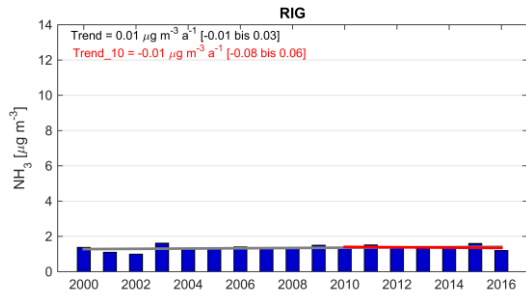
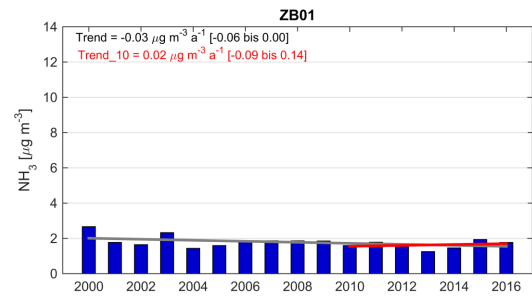
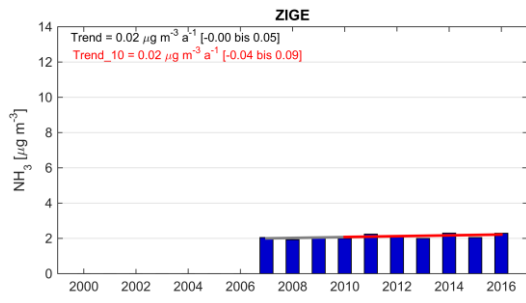
5.4.2 Jahresmittel-Trends











5.5 Frachten

