



Ammoniakdynamik im Robenhuserriet

**Hochauflösende Messungen zur Eingrenzung von
Quelleneinflüssen in den Jahren 2021/22**

Impressum

Herausgeber: OSTLUFT – Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein

Projektteam: Roy Eugster, Jörg Sintermann

Titelbild: NSG Robenhuserriet Oktober 2021, Quellenangabe: © Foto Jörg Sintermann

Copyright: © OSTLUFT, Abdruck mit Quellenangabe erwünscht

Bezug und weitere Informationen: Download pdf: www.ostluft.ch (eine gedruckte Fassung liegt nicht vor)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Ausgangslage und Fragestellung	2
2 Standorte und Messprogramm	3
3 Witterungsverlauf	6
4 Ammoniak-Konzentrationen	9
4.1 Räumliche Konzentrationsverteilung	9
4.2 Jahresgang	9
4.3 Konzentrationsdynamik während Gülleperioden	11
5 Einschätzung von lokalen Quelleneinflüssen	14
5.1 Verteilung der horizontalen Ammoniakfracht	15
5.2 Kaltluftabflüsse	17
6 Fazit	18
Anhang	19
Methodisches	19
Verzeichnisse	21

Zusammenfassung

Im Naturschutzgebiet Robenhuserriet beim Pfäffikersee wurde über die Jahre 2021 und 2022 an sieben Standorten Ammoniak (NH_3) gemessen. Zum Einsatz kamen Passivsammler und ein kontinuierliches Messgerät (miniDOAS) um die Dynamik der Ammoniakbelastung zu messen. Daneben wurden auch Meteorparameter erfasst.

Die Standorte in der landwirtschaftlichen Randzone lagen bei den Jahresmittelwerten rund 25% höher als jene in der Kernzone des Naturschutzgebietes und der städtischen Randzone. Die Belastung der letzteren zwei Zonen unterscheidet sich nur wenig voneinander. Alle Standorte weisen einen Jahresgang auf: Höhere NH_3 -Konzentrationen während der wärmeren und tiefere während der kalten Jahreszeit. Während den Gülleperioden im Frühling zeigt das miniDOAS eine auffällige Konzentrationsdynamik in den Tagesmittelwerten. Sobald die Gülle auf die Felder in der näheren Umgebung verteilt wird, steigt die Ammoniakkonzentration deutlich an und verbleibt dann auf einem verhältnismässig hohen Niveau. Nur wenn es regnet sinkt die Konzentration wieder, welche dann aber nochmals leicht ansteigt. Bei Regen wird das gasförmige Ammoniak aus der Luft ausgewaschen und dringt ins Erdreich ein. Ein Rest des Ammoniaks verbleibt aber auf der Bodenoberfläche und kann sobald es trockener wird wieder als Gas zurück in die Luft diffundieren.

Im Umfeld des miniDOAS befinden sich mehr oder weniger starke NH_3 -Quellen. Dies kann mittels Polarplots festgestellt werden. Die stärksten Quellen liegen dabei in mittlerer Entfernung in nordöstlicher bis östlicher Richtung.

Die horizontale Ammoniakfracht repräsentiert die Advektion von NH_3 und wird als Produkt der Konzentration und der Windgeschwindigkeit berechnet. Man kann sie als potenzielle Menge an NH_3 interpretieren, die zur lokalen Deposition zur Verfügung steht. Das Summendiagramm zeigt deren grösste Verfügbarkeit während den Frühlingsmonaten, wo am meisten Gülle ausgebracht wird.

Kaltluftabflüsse spielen im Winter oder nach Sonnenuntergang bei windschwachen Wetterlagen eine Rolle, wenn sich im Gelände Kaltluftströme bilden, welche das NH_3 aus Betrieben hangabwärts transportieren. Eine Analyse mittels dem Modell **KAL**luftanalyse **OS**tschweiz zeigt, dass einzig Quellen aus Nordost bis Ost einen Einfluss auf die Ammoniakkonzentration haben können.

1 Ausgangslage und Fragestellung

Flächendeckend werden im Schweizer Mittelland die kritischen Eintragsraten für Stickstoffverbindungen aus der Atmosphäre in empfindliche Ökosysteme (Critical Loads: CLO) und zumeist sogar die entsprechenden kritischen Konzentrationen für Ammoniak (Critical Levels: CLE) überschritten (Seitler et al. 2023, Kap. 4.2).

Hauptverursacher ist Ammoniak (NH_3) aus der intensiven Tierhaltung. Die Emissionen verschiedener Quellen (v.a. Ställe, Güllelager, Gülleausbringung) tragen zum Eintrag bei – in Modellstudien wurde bilanziert, dass rund die Hälfte der Einträge in Naturschutzgebieten (NSG) durch Quellen im nahen Umfeld (< 4 km Entfernung), der Rest durch die weiter entfernt liegenden Quellen verursacht wird (EKL 2014).

Der starke Einfluss von lokalen NH_3 -Quellen wie Ställen, Güllelager und zeitweilig Gülleausbringung auf Landwirtschaftsflächen verursacht zusammen mit Witterungseinflüssen eine starke zeitliche Dynamik der NH_3 Konzentrationen und Stickstoffeinträge. Mit Passivsammlermessungen und der üblichen Expositionsdauer von vier Wochen, lässt sich diese nur als Langzeitmittelwert ohne Tagesdynamik erfassen. OSTLUFT hat daher in einem Naturschutzgebiet im Kanton Zürich, dem Robenhuserriet beim Pfäffikersee (besterhaltener Verlandungskomplex der Nordschweiz mit Hoch- und Flachmooren, sowie Streu- und Moorwiesen), mit einem Messprojekt NH_3 und Meteorologie zeitlich hochaufgelöst gemessen, um Episoden mit hohen NH_3 -Konzentrationen und damit verbundenen Stickstoff-Einträgen zu identifizieren. Die Ergebnisse können dazu dienen, die Langzeitmessreihen von OSTLUFT mit Passivsammlern besser zu interpretieren sowie allgemein einzuschätzen, wie stark lokale Quellen die NH_3 -Dynamik im Naturschutzgebiet prägen. Die Messungen am «Schutzobjekt» dienen auch dazu, in der Öffentlichkeit das Problembewusstsein zu fördern.

Die Daten, welche dieser Untersuchung zugrunde liegen, können über das OGD-Portal heruntergeladen werden¹

¹ <https://www.zh.ch/de/politik-staat/statistik-daten/datenkatalog.html#/datasets/2384@awel-kanton-zuerich>

2 Standorte und Messprogramm

Das Naturschutzgebiet Robenhuserriet beim Pfäffikersee wird im Norden durch den See und im Süden durch das Siedlungsgebiet von Wetzikon begrenzt. Im Osten und Westen grenzen unmittelbar landwirtschaftlich bewirtschaftete Flächen, welche potenzielle NH₃-Quellen darstellen, wenn sie gedüngt werden. Weitere mögliche Quellen sind Tierhaltungsbetriebe im näheren und weiteren Umfeld. Fast überall im Schweizer Mittelland liegen empfindliche Ökosysteme im Einflussbereich landwirtschaftlicher Betriebe und das Robenhuserriet ist hier keine Ausnahme.

An insgesamt sieben Standorten im Gelände wurde die Ammoniakbelastung erfasst (Abbildung 1). Für die Beschreibung der räumlichen NH₃-Konzentrationsverteilung wurden Passivsammler (PS) jeweils vier Wochen lang exponiert. An einem zentralen Ort im Naturschutzgebiet wurde das kontinuierlich messende System miniDOAS eingesetzt (Sinterman et al 2016), welches zeitlich hochaufgelöst die Dynamik der Belastung erfasst (ausgewertet wurde auf Basis von 10-Minuten Mittelwerten). Die Messstandorte können in drei Standort-Lagetypen eingeteilt werden (Tabelle 1). Die Tabelle 2 zeigt, welche Messmethoden an welchem Standort verwendet wurde.

Abbildung 1: Messstandorte. In der Bildmitte befindet sich das Naturschutzgebiet. Die Nummern markieren die Messstandorte. Im Süden des Naturschutzgebiets befindet sich das Siedlungsgebiet von Wetzikon und im Osten und Westen, die landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen.

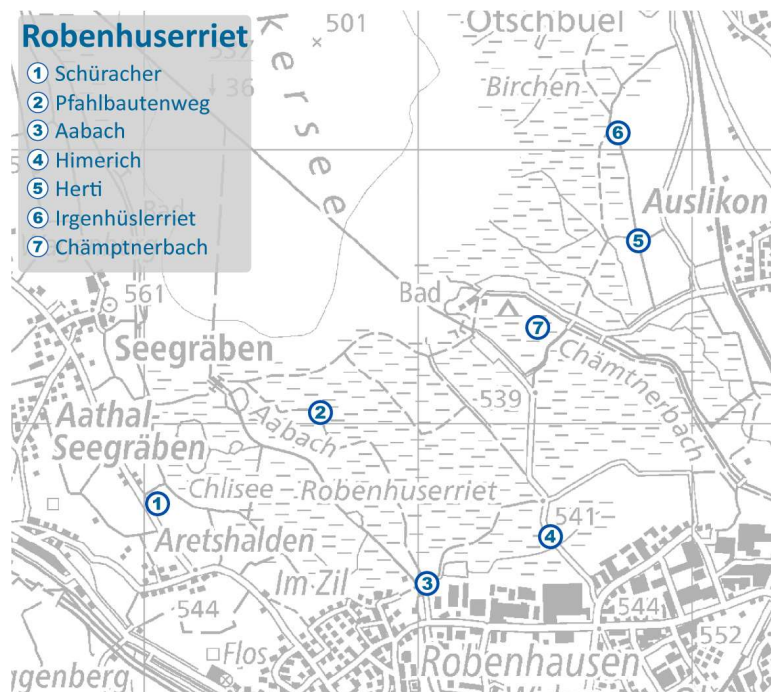


Tabelle 1: Typisierung der Messstandorte

Standorttyp	Standort-Nr. (ID)	Beschreibung
Kernzone	2, 7	Standorte unmittelbar im Naturschutzgebiet, zwischen 400 m bis 700 m von der landwirtschaftlichen/städtischen Zone entfernt
Landwirtschaftliche Randzone	1, 5, 6	in unmittelbarer Nähe zu intensiver bewirtschafteten Flächen
Städtische Randzone	3, 4	in unmittelbarer Nähe zum Siedlungsgebiet

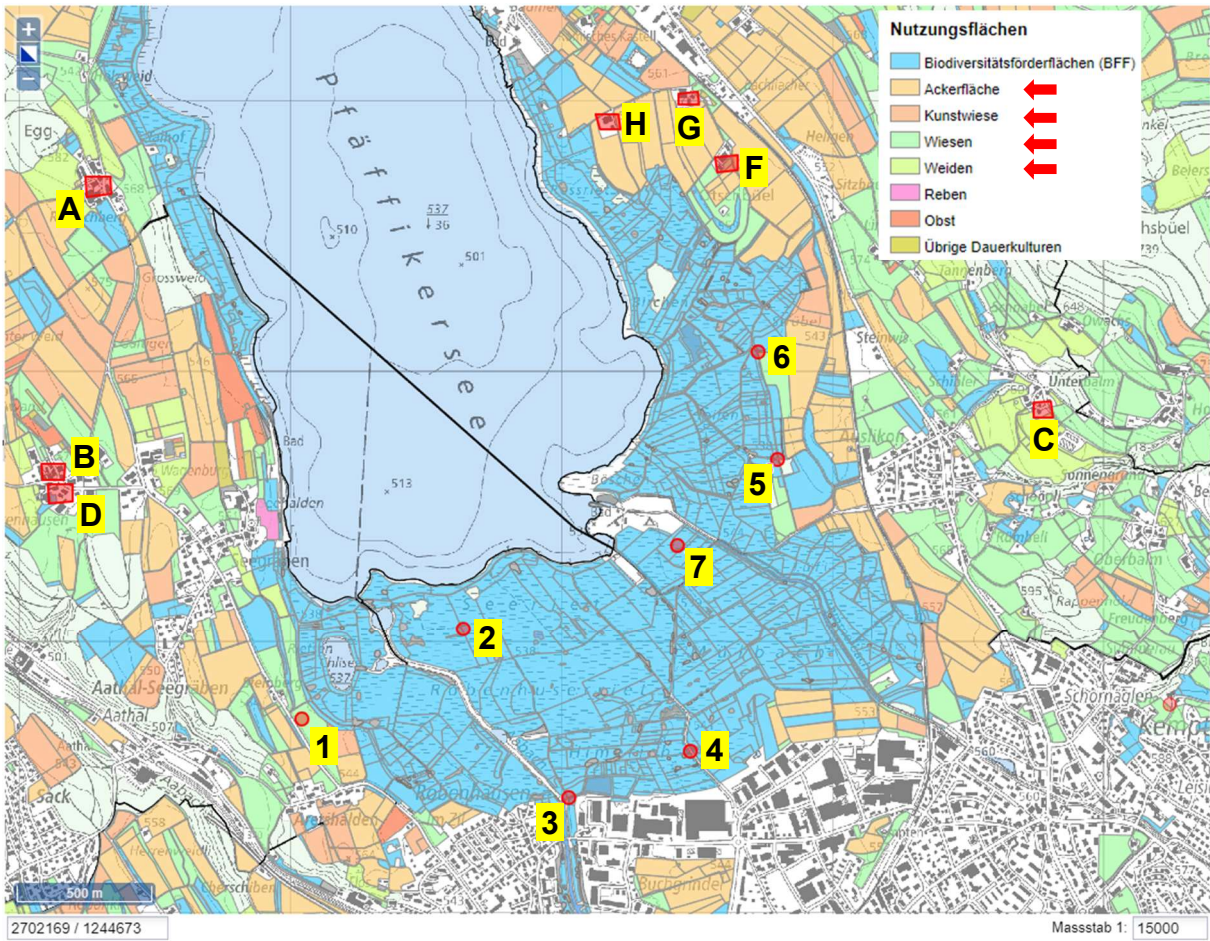
Tabelle 2: Messstandorte: Bezeichnung, Koordinaten, Messmittel und Messintervall an (Min. = Minuten, Wo = Wochen), Messdauer vom 29.01.2021 bis 31.01.2023

ID	Kurzname	Standortname	X-Koord	Y-Koord	Messmittel	Intervall
1	ROB-SCHÜ	Robenhuserriet - Schüracher	2'701'041	1'243'716	NH ₃ -PS	4 Wo
2	ROB-PFAH	Robenhuserriet - Pfahlbautenweg	2'701'636	1'244'049	NH ₃ -PS	4 Wo
3	ROB-AABA	Robenhuserriet - Aabach	2'702'025	1'243'425	NH ₃ -PS	4 Wo
4	ROB-HIME	Robenhuserriet - Himerich	2'702'476	1'243'596	NH ₃ -PS	4 Wo
5	ROB-HERT	Robenhuserriet - Herti	2'702'797	1'244'676	NH ₃ -PS	4 Wo
6	ROB-IRGE	Robenhuserriet - Irgenhüslerriet	2'702'723	1'245'070	NH ₃ -PS	4 Wo
7	ROB-CHÄM	Robenhuserriet - Chämpfnerbach	2'702'426	1'244'356	miniDOAS Meteo	10 Min. 10 Min.
7a		4 m Höhe			NH ₃ -PS	4 Wo
7b		1.3 m, auf Höhe Lichtstrahl miniDOAS			NH ₃ -PS	4 Wo

Zusätzlich wurden am Messstandort des miniDOAS (Tabelle 2 ID 7) auf 6 m über Grund auch die Meteoparameter Windgeschwindigkeit, -richtung und Lufttemperatur gemessen. Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Niederschlagsdauer, Globalstrahlung auf etwa 1 bis 1.5 m erfasst.

Die landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen, welche sich im Umfeld des Naturschutzgebietes befinden, werden während eines Betriebsjahres ein- oder mehrmals gedüngt, wobei bei Wiesen und Weiden vorzugsweise Hofdünger (Gülle/Mist) verwendet wird. Die Hofdüngergaben konzentrieren sich meist im Frühling (Leerrung der Lager) und im Herbst (Schaffung von Lagerkapazität für den Winter) und je nach Bedarf auch dazwischen. Um das Gebiet liegen auch verschiedene landwirtschaftliche Betriebe, welche als Punktquellen ebenfalls NH₃ emittieren können, welches über Ferntransport ins Naturschutzgebiet gelangen kann. Die Abbildung 2 zeigt die potenziellen NH₃-Quellen.

Abbildung 2: Messstandorte = rote Kreise (1-7); Potenzielle NH₃-Quellen: Flächenquellen = Ackerflächen, Kunstwiesen, Wiesen und Weiden (rote Pfeile in Legende); Punktquellen = rote Vierecke (A-H);



3 Witterungsverlauf

Die Witterung der Messjahre 2021 und 2022 unterscheidet sich deutlich voneinander. Die Monatsmittel der Lufttemperatur auf 6 m über Boden war im Jahr 2022 während dem Frühling und Sommer höher als im 2021 (Abbildung 3). Die Monate Mai, Juli und August waren um 3 °C bis 5 °C sogar deutlich höher als im Vorjahr.

Dies zeigt sich auch in der Globalstrahlung (Abbildung 4), wo auch der Mai, Juli und August 2022 eine deutlich höhere Einstrahlung hatten.

Abbildung 3: Lufttemperatur Monatsmittel auf 6 m über Boden am Standort des miniDOAS

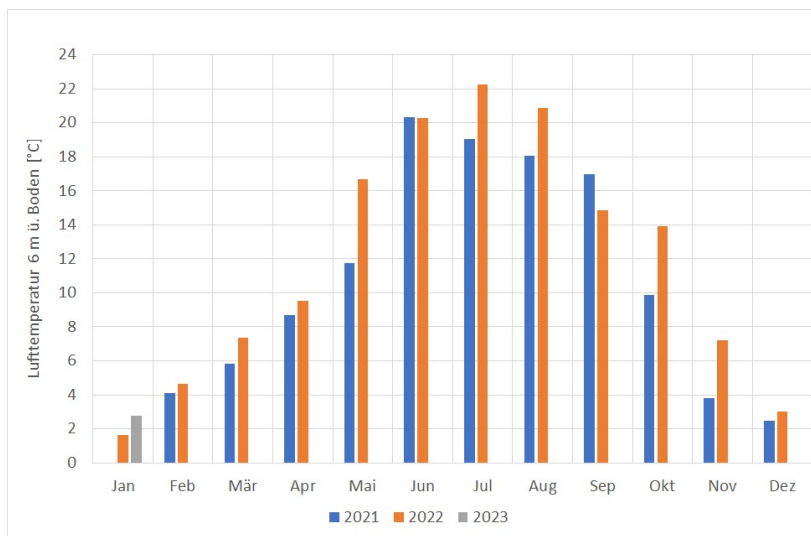
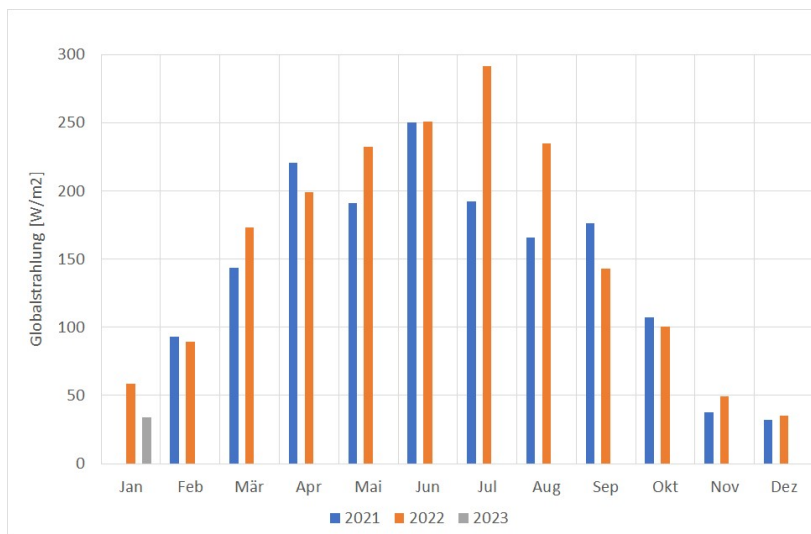


Abbildung 4: Monatsmittel der Globalstrahlung: Die Monate Mai, Juli und August 2022 weisen eine bis zu 52% höhere Strahlungsleistung als im Jahr 2021 auf

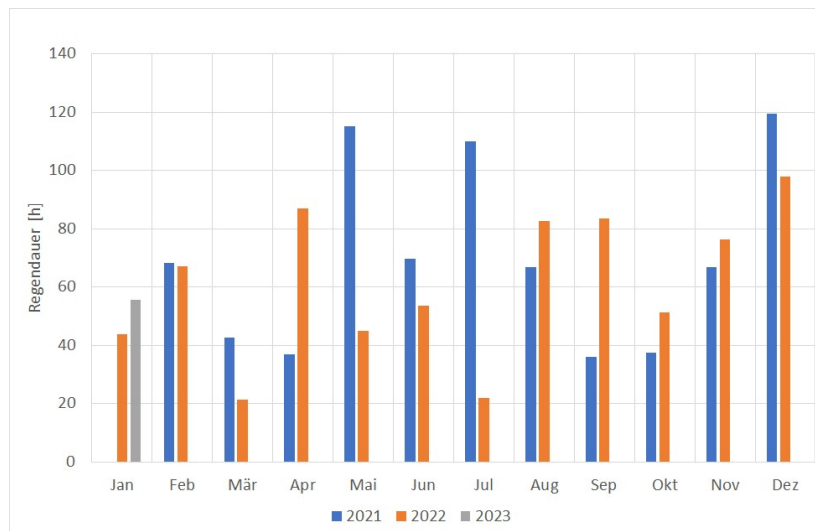


Die Regendauer, welche keine Auskunft über die Regenmenge gibt, war im Jahr 2022 während den Frühlings- und Sommermonaten – mit Ausnahme der Monate April und August – deutlich geringer als im Jahr 2021 (Abbildung 5). Vor allem in den Monaten Mai und Juli regnete es drei- bis fünfmal weniger lang als in den

gleichen Monaten im Jahr 2021. Dafür war die Regendauer in den Monaten April und September 2022 doppelt so hoch wie im Jahr 2021.

Der Regen ist ein wichtiger Parameter, wenn es um die Interpretation der Ammoniakbelastung geht. Ammoniak wird durch Regen sehr gut aus der Atmosphäre ausgewaschen und ist dann für die Messung der Luftbelastung nicht mehr verfügbar. Ebenso wichtig ist die Lufttemperatur, denn hohe Temperaturen begünstigen den Übergang von Ammoniak, z.B. von einem frisch begüllten Feld, in die Atmosphäre.

Abbildung 5: Regendauer in Stunden pro Monat am Standort des miniDOAS



Drei Hauptwindrichtungen können in der Geländekammer um den Messstandort beim miniDOAS während der ganzen Messdauer festgestellt werden (Abbildung 6):

- Südost: vor allem bedingt durch die Lage der Talebene
- Nordost: Bise
- West: Zyklonale Lagen, etwas breiter verteilt und nicht so akzentuiert wie die anderen zwei Hauptwindrichtungen

Werden die Windrichtungshäufigkeiten auf ihre Windgeschwindigkeitsklassen aufgeteilt, zeigt sich, dass Windgeschwindigkeit zwischen 0 und 2 m/s am häufigsten sind. Tag und Nacht unterscheiden sich deutlich voneinander (Abbildung 7). In der Nacht herrscht vor allem die südöstliche Windrichtung mit höheren Windgeschwindigkeiten (> 2 m/s) vor, wohingegen am Tag eher Westwindlagen mit tieferen Geschwindigkeiten dominieren.

Abbildung 6: Digitales Höhenmodell der Region um den Standort des miniDOAS (roter Kreis) und Häufigkeitsverteilung der Windparameter

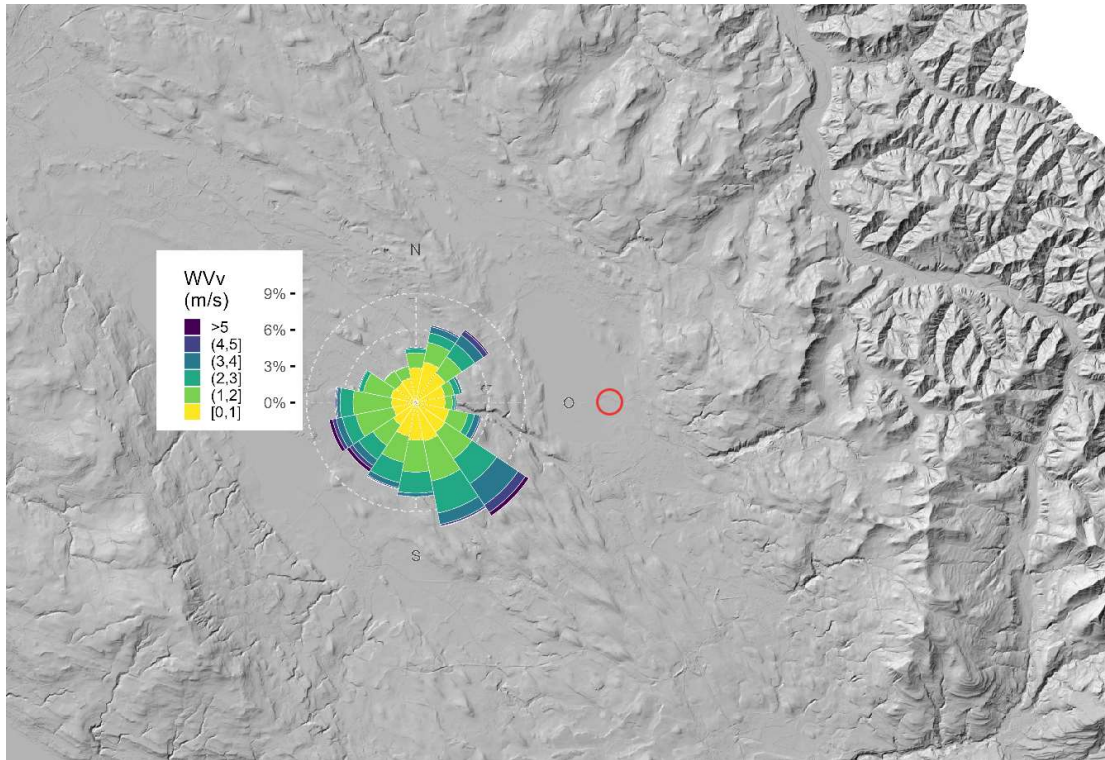
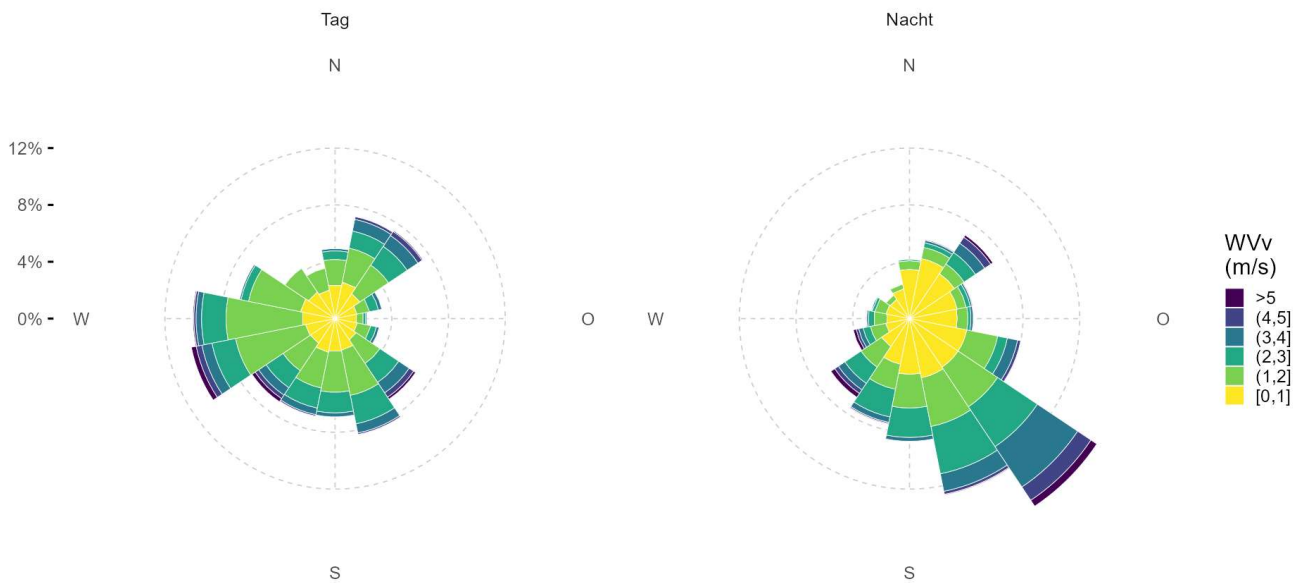


Abbildung 7: Windrosen über die gesamte Messdauer von 2021 bis 2022. In beiden Windrosen ist die Häufigkeit pro Windrichtung und Windgeschwindigkeitsklasse eingezeichnet, links für den Tag und rechts für die Nacht. (Tag/Nacht = Sonnenauf- bzw. -untergang)



4 Ammoniak-Konzentrationen

4.1 Räumliche Konzentrationsverteilung

In den Randgebieten des Naturschutzgebietes zu den Landwirtschaftsflächen wurden NH₃-PS gesetzt (Abbildung 1: Nr. 1-6, bzw. Tabelle 2: ID 1-6), welche über jeweils vier Wochen die NH₃-Belastung messen. Im Zentrum des NSG befindet sich ein weiterer NH₃-Messstandort (Abbildung 1: Nr. 7, bzw. Tabelle 2: ID 7a). Die Abbildung 8 der Jahresmittelwerte zeigt, dass die Standorte der Kernzone (ID 2 und 7), sowie der städtischen Randzone (ID 3 und 4), welche weiter von den landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen entfernt sind, ähnlich tiefe NH₃-Konzentrationen aufweisen. In der landwirtschaftlichen Randzone (ID 1, 5-6) ist die NH₃-Konzentration im Mittel rund 16-28% höher.

Abbildung 8: NH₃-Jahresmittelwerte der zu den zu den Standorttypen zusammengefassten Passivsammler (orange = landw. Randzone ID 1, 5, 6; grün = Kernzone ID 2, 7; gelb = städt. Randzone ID 3, 4)



4.2 Jahrgang

Die NH₃-Monatsmittel (Abbildung 9) zeigen einen typischen Jahrgang (Seitler et al. 2023, Kap. 4.6): Höhere NH₃-Konzentrationen während der wärmeren und tiefere während der kalten Jahreszeit (Abbildung 10). Auffällig sind die deutlich höheren NH₃-Konzentrationen in den Frühlingsmonaten (Abbildung 11). Dies deckt sich mit der ersten Gülleausbringung und der damit einhergehenden Leerung der Güllelager. Ein Monat, der März 2022, ist besonders auffällig. Das Monatsmittel ist dort 2 bis 2.5-mal höher als während allen anderen Monaten.

Abbildung 9: Jahrgang der NH₃-Monatsmittelwerte (orange = landw. Randzone, grün = Kernzone, gelb = städt. Randzone)

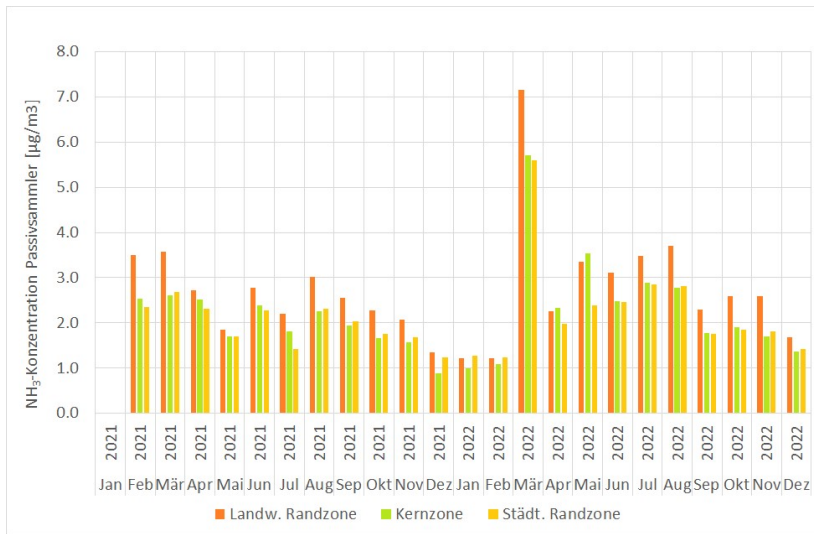


Abbildung 10: Jahrgang der NH₃-Monatsmittelwerte über die Jahreszeiten (orange = Landw. Randzone, grün = Kernzone, gelb = Städt. Randzone)

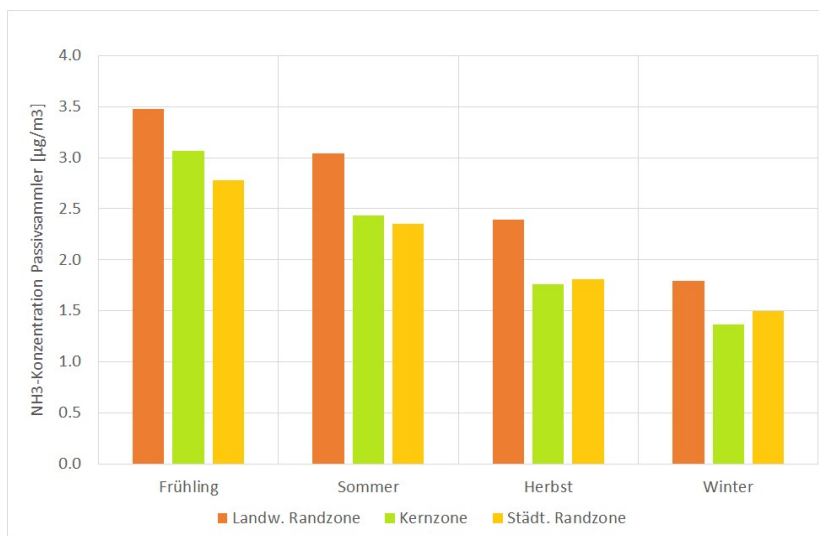
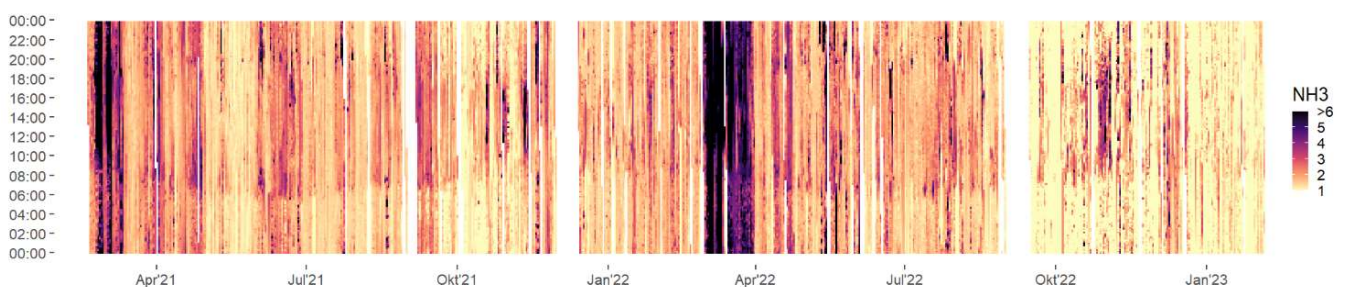


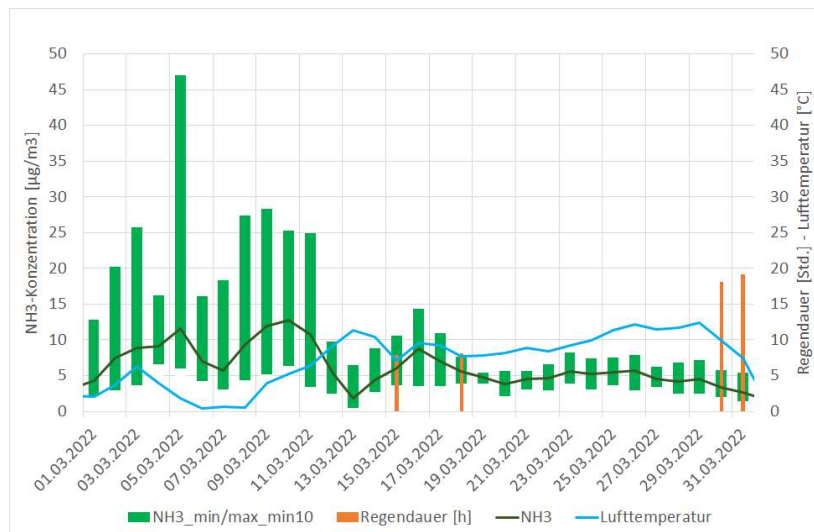
Abbildung 11: Heatmap der NH₃ 10-Minutenmittelwerte (Einheit: µg/m³) über die gesamte Messperiode. Klar sichtbar sind die hohen Ammoniakkonzentrationen in den Frühlingsmonaten am Standort des miniDOAS.



4.3 Konzentrationsdynamik während Gülleperioden

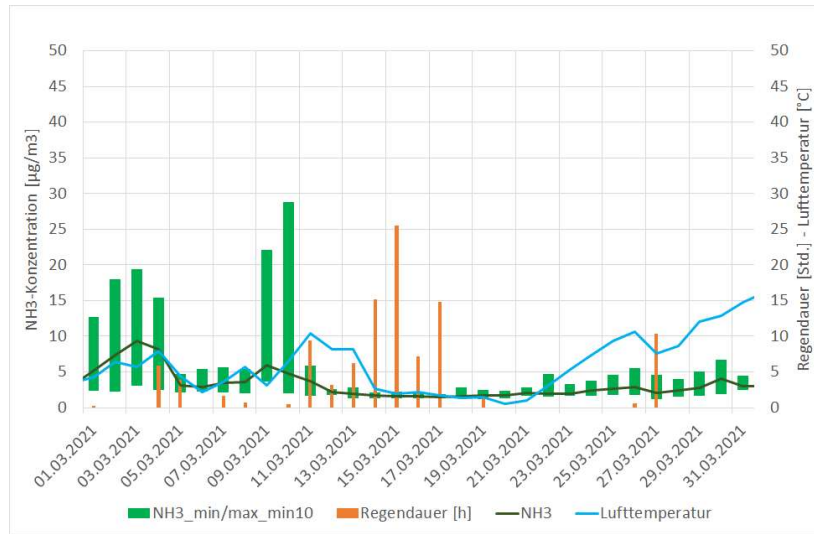
Bei der Betrachtung der Monatsmittelwerte ist der März 2022 mit seiner herausstechenden NH₃-Konzentration aufgefallen. Wird dieser Monat über die Tagesmittelwerte detailliert betrachtet (Abbildung 12), sind drei Maxima bei der NH₃-Konzentration auffällig: am 5. März, am 10. März und am 16. März. Das sind Hinweise, dass vor oder während diesen Tagen in der näheren Umgebung Gülle ausgebracht wurde. Die ersten zwei Tagesmittelmaxima liegen um 11.5 bis 12.5 µg/m³, das dritte Tagesmittelmaximum um 8.5 µg/m³. Der Monat war eher trocken, erst am Ende des Monats hat es häufiger geregnet. Auffällig ist auch die grosse Varianz der min./max. 10-Minutenmittelwerte vor dem ersten Regen am 15.03.2022.

Abbildung 12: Tagesmittel der NH₃-Konzentration mit min/max der 10-Minutenmittelwerten, Lufttemperatur, sowie Tages-Niederschlagsdauer im Monat März 2022. Die drei NH₃-Maxima weisen auf eine Gülleausbringung in der Umgebung hin. (dunkelgrün = NH₃-Tagesmittel, grüne Balken = min/max NH₃ 10-Min., hellblau = Lufttemperatur, orange = Niederschlagsdauer)



Wird dieser Monat mit dem März 2021 verglichen (Abbildung 13), können dort zwei NH₃-Maxima am 3. März und 9. März festgestellt werden. Jedoch sind diese mit 9.4 bzw. 6 µg/m³ nicht so hoch wie im Folgejahr. Dies ist auf den häufigeren Niederschlag zurückzuführen, welcher das Ammoniak sehr gut aus der Atmosphäre herauswäscht. Das Monatsmittel erreicht so nur rund 50% vom März 2022.

Abbildung 13: Tagesmittel der NH₃-Konzentration mit min/max der 10-Minutenmittelwerten, Lufttemperatur, sowie Tages-Niederschlagsdauer im Monat März 2021. Die feuchte und kühle Witterung begünstigt tiefere NH₃-Konzentrationen. (Farben analog Abbildung 12)

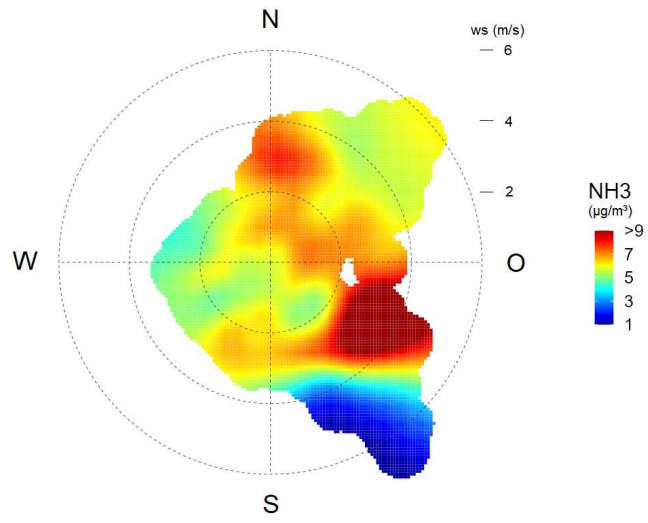


Wenn es die Witterung nach dem Winter erlaubt, wird im Frühling so früh wie möglich die Gülle auf die Felder ausgebracht. Einerseits als erste Düngergabe auf den Wiesen- und Weideflächen für den Graswuchs, andererseits aber auch um die Lager zu leeren um wieder Lagerkapazität zu schaffen. Die Gülleausbringung kann je nach Betrieb im restlichen Jahr zusätzlich noch mehrfach erfolgen, spätestens aber im November, um die Lagerkapazität über den Winter zu gewährleisten.

Sobald in der Umgebung des miniDOAS Gülle auf die Felder gebracht wird, steigt die NH₃-Konzentration deutlich an (Abbildung 12 und Abbildung 13). Die NH₃-Konzentration sinkt dann mit der Zeit, um beim nächsten Ausbringen wieder stark anzusteigen. Wird längere Zeit nicht gegüllt, wie z.B. nach dem 16. März 2022, sinkt zwar die NH₃-Konzentration, verbleibt aber auf einem verhältnismässig hohen Niveau (bis 30. März 2022). Sobald aber länger dauernder Regen einsetzt, sinkt die NH₃-Konzentration deutlich, da das gasförmige Ammoniak aus der Luft ausgewaschen wird und ins Erdreich eindringt. Ein Rest des Ammoniaks verbleibt aber auf der Bodenoberfläche und kann sobald es trockener wird wieder als Gas zurück in die Luft diffundieren. Somit steigt die NH₃-Konzentration wieder an.

Der Polarplot für den Monat März 2022 (Abbildung 14) zeigt eine allgemein erhöhte Hintergrundbelastung aus allen Windrichtungen um 5 µg/m³ aufgrund der Gülleausbringung in allen Regionen. Höhere Konzentrationen bis >9 µg/m³ werden aus N bis SW bei tieferen bis mittleren Windgeschwindigkeiten festgestellt. Das ist ein Hinweis auf Emissionen aus angrenzenden Landwirtschaftsflächen (Abbildung 2). Dies verursacht im Verhältnis zur Hintergrundkonzentration einen Zusatzbeitrag von 2 bis 4 µg/m³.

Abbildung 14: Polarplot der Ammoniakkonzentration für den Monat März 2022.

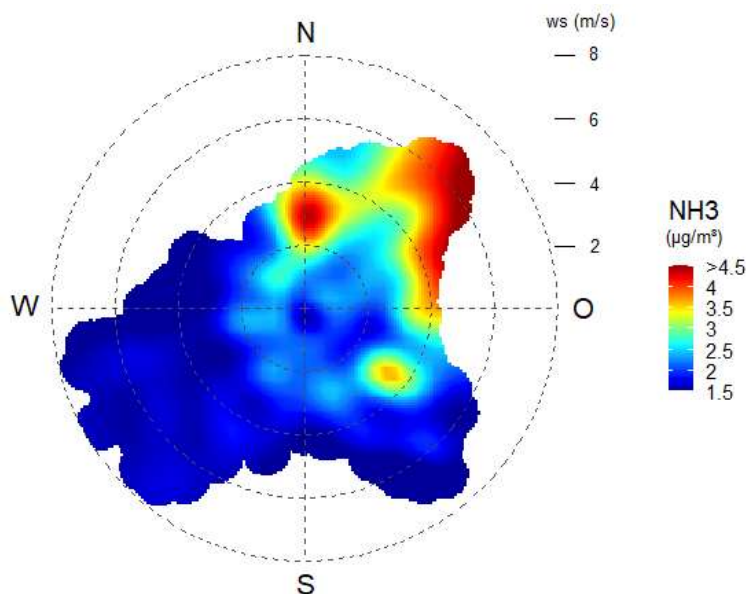


5 Einschätzung von lokalen Quelleneinflüssen

Unter lokalen Quelleneinflüssen sind die Auswirkungen lokaler NH_3 -Quellen zu verstehen. Auf das Naturschutzgebiet Robenhuserriet bezogen sind das im Umkreis von bis zu 4 km jegliche landwirtschaftlich bewirtschaftete Flächen und Landwirtschaftsbetriebe in denen Tierhaltung betrieben wird und Flächen gedüngt werden. Der Strassenverkehr kann potenziell ebenfalls NH_3 emittieren. Jedoch sind landwirtschaftliche Emissionen dominierend (Kupper et al. 2022).

Der Polarplot in Abbildung 15 zeigt, dass sich im Umfeld des miniDOAS Messstandortes mehr oder weniger starke NH_3 -Quellen befinden. Dabei kommen bei erhöhten Windgeschwindigkeiten aus der Richtung Nord bis Ost die höchsten Konzentrationen an. Es scheint auch eine Hotspot aus Richtung Südost zu geben. Hohe NH_3 -Konzentrationen bei tiefen Windgeschwindigkeiten (bis 2 m/s) weisen auf starke Quellen in unmittelbarer Umgebung der Messung hin und hohe Konzentrationen bei erhöhten Windgeschwindigkeiten (ab 2 m/s) weisen auf Quellen in etwas grösserer Entfernung hin. Konkret heisst das für das Robenhuserriet, dass Quellen ausserhalb des Naturschutzgebietes einen deutlichen Einfluss innerhalb des Gebietes ausüben. Hotspots liegen dabei in mittlerer Entfernung in nordöstlicher bis östlicher Richtung.

Abbildung 15: Polarplots der NH_3 10-Minutenmittelwerte (Windrichtung, -geschwindigkeit ws, NH_3 -Konzentration) über die gesamte Messdauer von 2021 bis 2022. Bei höheren Windgeschwindigkeiten (4-8 m/s) werden vor allem aus Nordost erhöhte NH_3 -Konzentrationen gemessen. Zwei Hotspot im Norden und Südosten zeigen sich bei mittleren Windgeschwindigkeiten (2-4 m/s). Bildmitte = Standort miniDOAS. Es wurde beim Polarplot kein grösserer Unterschied zwischen Tag und Nacht festgestellt und daher hier alle Zeiten gemeinsam gemittelt.

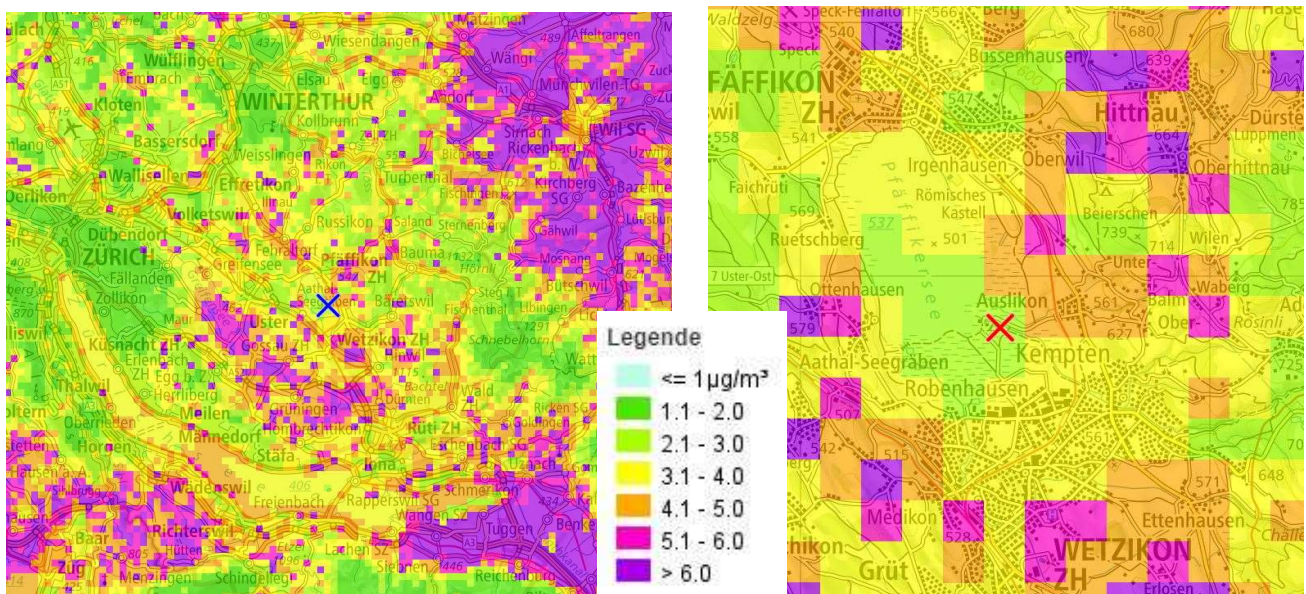


Bei Betrachtung der NH_3 -Belastungskarten² (Abbildung 16) fällt auf, dass sich überregional im Nordosten, Südosten und Südwesten grosse Regionen mit einer sehr hohen NH_3 -Belastung befinden. Das sind Quellen, welche beim NH_3 -Ferntransport eine Rolle spielen können. Regional gibt es vor allem im Nordosten ein grösseres Gebiet mit sehr hohen NH_3 -Belastungen, aber es gibt auch im Umkreis von rund 2 km noch vereinzelt Zellen mit

² Karte [Ammoniakkonzentrationen](#) BAFU, Bezugsjahr 2020

einer höheren NH₃-Belastung. Die regionale Belastungssituation widerspiegelt sich recht gut auch im Polarplot (Abbildung 15) vor allem bei Windgeschwindigkeiten um 2 m/s.

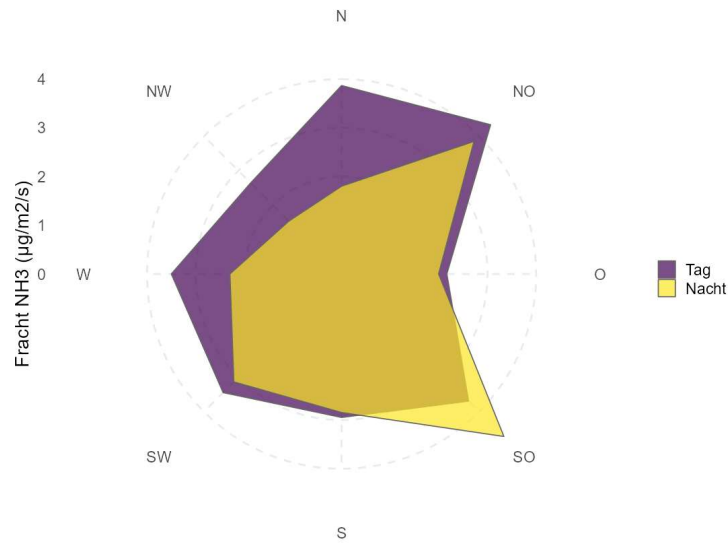
Abbildung 16: Belastungskarte Ammoniak. Der linke Ausschnitt (46 km x 46 km) zeigt die überregionale NH₃-Belastung und der rechte Ausschnitt (8 km x 8 km) die regionale Belastung (Rasterung: 500 m x 500 m; farbiges Kreuz in Bildmitte = Standort miniDOAS)



5.1 Verteilung der horizontalen Ammoniakfracht

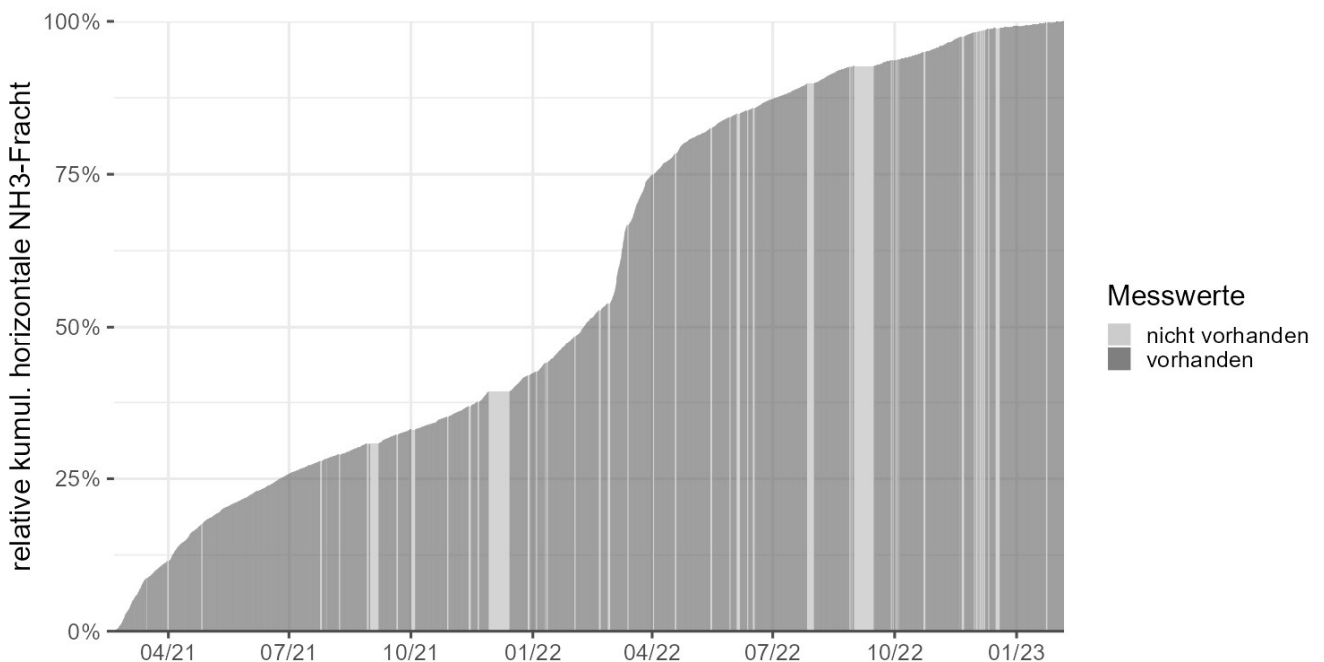
Die horizontale Ammoniakfracht repräsentiert die Advektion von NH₃ und wird als Produkt der Konzentration und der Windgeschwindigkeit berechnet. Man kann die Fracht als qualitatives Mass für die Menge an NH₃ interpretieren, die zur lokalen Deposition zur Verfügung steht. Durch die Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit wird der verdünnende bzw. akkumulierende Effekt starker oder fehlender Durchmischung bei hoher oder niedriger Windgeschwindigkeit herausgerechnet. Somit liefert die mittlere Windrichtungsverteilung der Fracht (Abbildung 17) auch einen Hinweis auf die Richtung wichtiger NH₃-Quellen. Tagsüber finden sich höhere Frachten aus Nord bis Nordost und Südost sowie etwas erhöht aus West bis Südwest. Dies verdeutlicht, dass Quellen aus Richtung Nordost und Südost einen überproportionalen Einfluss beim Transport von NH₃ in das Robenhuserriet haben. Wahrscheinlich überlagern sich dabei die Einflüsse nahe gelegener Quellen mit denen der weiter entfernten regionalen NH₃-Hot-Spots (in Richtung Südwest, Südost und Nordost, vergleiche Abbildung 16). In der Nacht schwächt sich die Fracht aus dem Sektor West bis Nord ab. Jene aus Nordost bleibt mehr oder weniger gleich hoch und jene aus Südost ist deutlich erhöht. Dies ist auf das Wirken von Kaltluftabflüssen sowie die geänderte Windverteilung in der Nacht zurückzuführen (vergleiche Abbildung 7).

Abbildung 17: Horizontale Ammoniakfracht über die gesamte Messdauer von 2021 bis 2022. In dieser Darstellung sind die Ammoniakfrachten am Tag und in der Nacht dargestellt



Werden die Frachten auf das aufsummiert, was einer kumulierten Belastung entspricht, fallen einige Punkte auf. Der Messbeginn war erst am 19.02.2021. Trotz der kalten Witterung wird bis Ende April 2021 20% der gesamten Fracht verursacht. Die Kurve steigt dann mehr oder weniger gleichmässig bis Ende 2021 an. In dieser Zeit entstehen nochmals ca. 20% der Fracht. Die Monate Januar und Februar wiesen eine bis 60% höhere Windgeschwindigkeit auf, was einen Anstieg der Fracht um knapp 15% verursacht hat. Der darauffolgende März und April verursachen nochmals rund 25% der Fracht, was einerseits auf das Ausbringen der Gülle und andererseits auf eine erhöhte Windgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Der Rest des Jahres 2022 entwickelt sich ähnlich gleichmässig wie das Vorjahr.

Abbildung 18: Aufsummierte horizontale Frachten als potenziell verfügbares Ammoniak für die Deposition (hellgrau = Lücken wegen fehlender Daten)

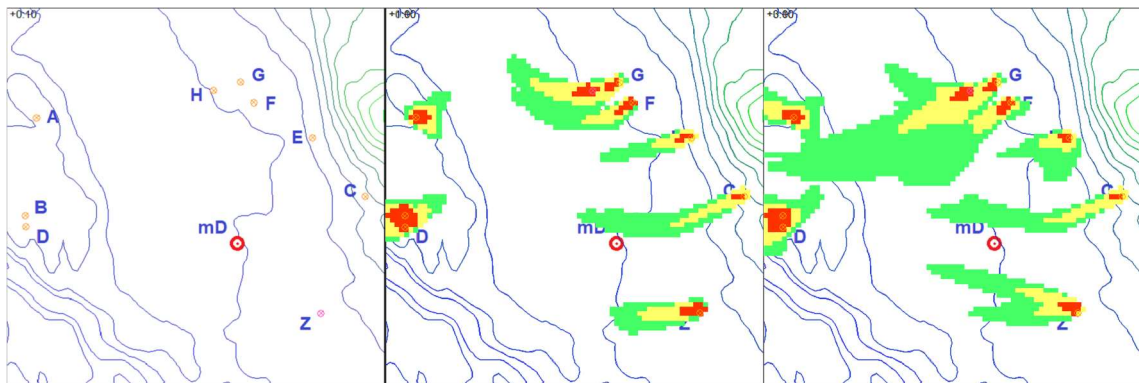


5.2 Kaltluftabflüsse

Die umliegenden, NH_3 emittierenden landwirtschaftlichen Betriebe können NH_3 insbesondere auch dann in das Naturschutzgebiet eintragen, wenn im Winter oder nach Sonnenuntergang bei windschwachen stabilen Wetterlagen sich im Gelände Kaltluftströme bilden, die das NH_3 hangabwärts transportieren. Die Abbildung 19 zeigt die mit KALOS³ modellierten möglichen Kaltluftabflüsse der umliegenden Betriebe und wie weit sie ins Gelände des Robenhuserriets gelangen können. In den Polarplots (Abbildung 15) zeigen die Messwerte eine erhöhte NH_3 -Belastung während der Nacht aus derselben Richtung, wie sie mit KALOS modelliert wurde.

Die Abbildungen zeigen, dass nur jene möglichen Punktquellen via Kaltluftabfluss einen Einfluss auf die NH_3 -Belastung haben können, welche sich im Osten des Pfäffikersees befinden.

Abbildung 19: Kaltluftabflüsse im Gebiet des Robenhuserriets. Das linke Bild zeigt die Ausgangslage der potenziellen Quellen (A-H, Z) und den Messstandort des miniDOAS (mD). Das mittlere Bild zeigt die Ausdehnung nach 1 Stunde des Einsetzens der Kaltluftabflüsse und das rechte Bild nach 7 Stunden. (modelliert mit KALOS)



³ KALtluftanalyse OSTschweiz, Software v2.20

6 Fazit

- Ammoniakquellen in der näheren und weiteren Umgebung beeinflussen das Naturschutzgebiet. Dies wird durch Konzentrationsgradienten von den landwirtschaftlichen Randzonen in das Naturschutzgebiet deutlich sowie durch die hohen Ammoniak-Konzentrationen während Perioden in denen ausserhalb des Gebietes Gülle ausgebracht wird.
- Die Siedlungsnähe hat kaum einen Einfluss auf die Ammoniakkonzentration des Robenhuserriets.
- Wird Gülle in der Nähe ausgebracht, wirkt das direkt auf das gesamte Gebiet und verursacht eine deutlich erhöhte Ammoniakbelastung.
- Sobald es regnet, sinkt die NH_3 -Konzentration deutlich, da das gasförmige Ammoniak aus der Luft ausgewaschen wird und ins Erdreich eindringt. Ein Rest des Ammoniaks verbleibt aber auf der Bodenoberfläche und kann sobald es trockener wird wieder als Gas zurück in die Luft diffundieren. Somit steigt die NH_3 -Konzentration wieder an.
- Polarplots und eine KALOS Analyse sind geeignete Mittel um mögliche Quellen qualitativ zu identifizieren. Dies funktioniert aber nur zusammen mit einem Messgerät, welches hochaufgelöst die Ammoniakkonzentration misst und mit der Erfassung der Windparameter.
- Das Verteilen von Gülle in der näheren und weiteren Umgebung verursacht eine erhebliche Ammoniakfracht, welche potenziell für die Deposition im Naturschutzgebiet zur Verfügung steht.

Anhang

Methodisches

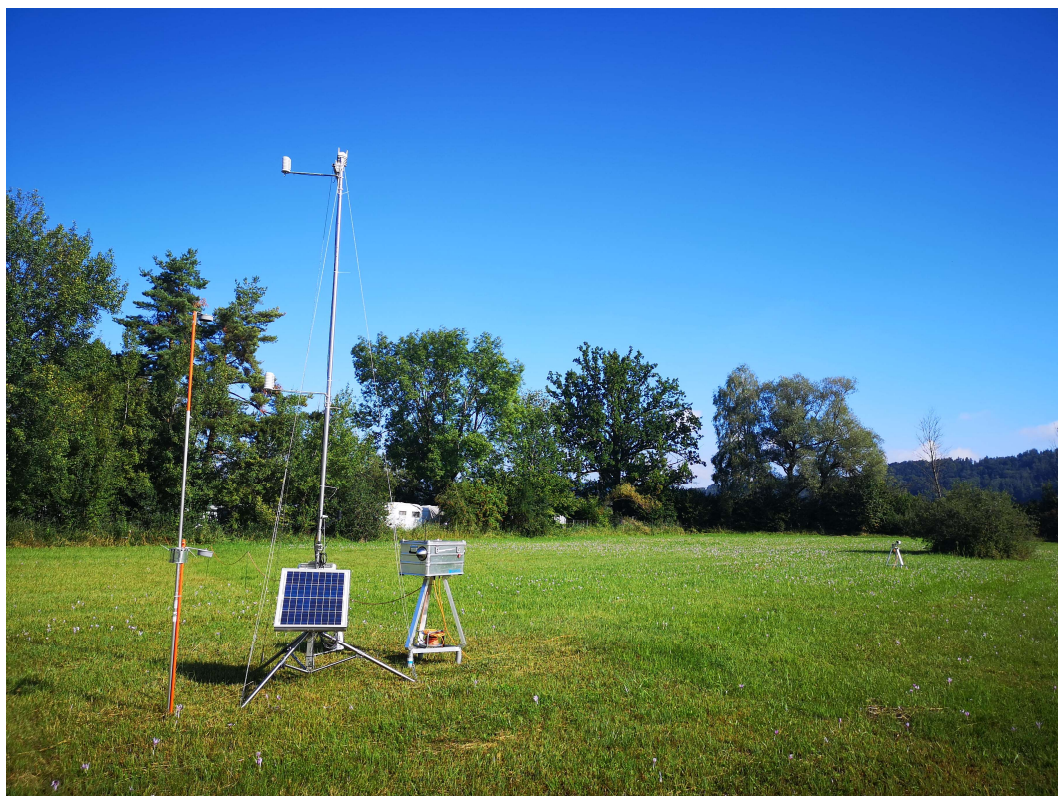
Die Erfassung mit dem miniDOAS (Abbildung 20) erfolgte über 1 Minute, die Messwerte wurden aber auf 10-Minutenmittelwerte verdichtet. Vom 29.01.2021 bis 31.01.2023 wurden insgesamt 105'452 NH₃-10-Minutenmittelwerte erhoben und einer Qualitätsprüfung unterworfen. Die Parameter für die Prüfung waren der Messwert selbst (NH₃), der zugehörige Standardfehler (NH₃_se), die gemittelte Lichtintensität des Signals (I_adj_mean) und die Datenabdeckung (coverage) im 10-Minutenintervall.

Der 10-Minutenmittelwert ist nur dann gültig, wenn alle nachstehenden Bedingungen erfüllt werden:

I_adj_mean >= 2'500	(NH ₃ <= 5 UND NH ₃ _se <= 0.6) ODER (NH ₃ > 5 UND NH ₃ _se <= NH ₃ /15)	coverage >= 0.5
---------------------	---	-----------------

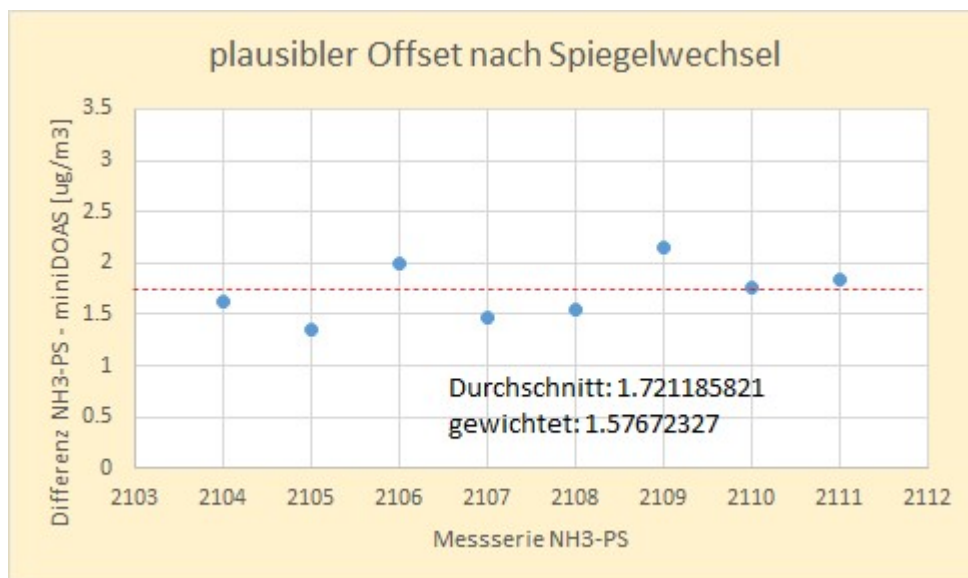
Die dabei entstehenden Datenlücken wurden mittels linearer Imputation gefüllt. Die maximal mittels Imputation füllbare Datenlücke war bei 100 Werten angesetzt. Insgesamt konnten so 4'627 fehlende Messwerte imputiert werden. Bei 13'064 Werten war dies nicht möglich, da die Datenlücken zu gross waren. Die grösste Datenlücke mit 2'860 Werten war zu Beginn der Messung, als ein defekter Spiegel ersetzt werden musste. Zwei weitere grössere Datenlücken waren jeweils im Spätsommer als die Rietfläche gemäht wurde (2021: 1'074 Werte, 2022: 2'140 Werte), sowie Ende 2021, als Probleme mit der Heizung des Reflektorspiegels bestanden (2'020 Werte).

Abbildung 20: Messinfrastruktur: miniDOAS (dritte von links), Meteoanlage (zweite von links) und NH₃-Passivsammler (ganz links). Ganz rechts im Bild (30 m Abstand rechts) ist der Reflektorspiegel des miniDOAS.



Für die Messung mit dem miniDOAS wird während dem Betrieb ein Referenzspektrum aufgezeichnet, welches über die gesamte Messdauer Bestand hat. Dieses Referenzspektrum dient dazu, die relative NH₃ Konzentration zu bestimmen. Da die Luft während der Aufzeichnung eines solchen Spektrums im Messbetrieb immer Ammoniak enthält, welches bei der ausgewerteten relativen Konzentration als Offset wirkt, muss dieser Offset bestimmt werden. Jegliche Änderungen an den Spiegeln (z.B. Wechsel, Reinigung) bedingt die Aufzeichnung eines neuen Referenzspektrums und damit die Bestimmung des neuen Offsets (Sintermann et al. 2016). Im vorliegenden Fall wurden zwei Referenzspektren aufgezeichnet, da es Probleme mit den Spiegeln gab. Die Bestimmung des Offsets erfolgt über den Vergleich von NH₃-PS, parallel zum miniDOAS exponiert, mit den gemittelten miniDOAS Werten über die gleiche Zeitperiode. Die Differenz aus NH₃-PS und miniDOAS Periodenmittelwert ergibt den mittleren Offset, welcher zu den miniDOAS Messwerten addiert wird.

Abbildung 21: Beispiel einer Offset-Bestimmung, hier nach dem Wechsel eines Umlenkspiegels. Idealerweise bewegen sich die Differenzwerte regelmässig um den Mittelwert (rote Linie) des Zeitabschnitts, in welchem der Offset gilt. (x-Achse = Seriennummer NH₃-Passivsammler; y-Achse = Differenz zwischen miniDOAS und NH₃-Passivsammler)



Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messstandorte. In der Bildmitte befindet sich das Naturschutzgebiet. Die Nummern markieren die Messstandorte. Im Süden des Naturschutzgebiets befindet sich das Siedlungsgebiet von Wetzikon und im Osten und Westen, die landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen.	3
Abbildung 2: Messstandorte = rote Kreise (1-7); Potenzielle NH ₃ -Quellen: Flächenquellen = Ackerflächen, Kunstwiesen, Wiesen und Weiden (rote Pfeile in Legende); Punktquellen = rote Vierecke (A-H);	5
Abbildung 3: Lufttemperatur Monatsmittel auf 6 m über Boden am Standort des miniDOAS	6
Abbildung 4: Monatsmittel der Globalstrahlung: Die Monate Mai, Juli und August 2022 weisen eine bis zu 52% höhere Strahlungsleistung als 2021 auf	6
Abbildung 5: Regendauer in Stunden pro Monat am Standort des miniDOAS	7
Abbildung 6: Digitales Höhenmodell der Region um den Standort des miniDOAS (roter Kreis) und Häufigkeitsverteilung der Windparameter	8
Abbildung 7: Windrosen über die gesamte Messdauer von 2021 bis 2022. In beiden Windrosen ist die Häufigkeit pro Windrichtung und Windgeschwindigkeitsklasse eingezeichnet, links für den Tag und rechts für die Nacht.	8
Abbildung 8: NH ₃ -Jahresmittelwerte der zu den zu den Standorttypen zusammengefassten Passivsammler (orange = landw. Randzone ID 1, 5, 6; grün = Kernzone ID 2, 7; gelb = städt. Randzone ID 3, 4)	9
Abbildung 9: Jahresgang der NH ₃ -Monatsmittelwerte (orange = Landw. Randzone, grün = Kernzone, gelb = Städt. Randzone)	10
Abbildung 10: Jahresgang der NH ₃ -Monatsmittelwerte über die Jahreszeiten (orange = Landw. Randzone, grün = Kernzone, gelb = Städt. Randzone)	10
Abbildung 11: Heatmap der NH ₃ 10-Minutenmittelwerte (Einheit: µg/m ³) über die gesamte Messperiode. Klar sichtbar sind die hohen Ammoniakkonzentrationen in den Frühlingsmonaten am Standort des miniDOAS.	10
Abbildung 12: Tagesmittel der NH ₃ -Konzentration mit min/max der 10-Minutenmittelwerten, Lufttemperatur, sowie Tages-Niederschlagsdauer im Monat März 2022. Die drei NH ₃ -Maxima weisen auf eine Gülleausbringung in der Umgebung hin. (dunkelgrün = NH ₃ -Tagesmittel, grüne Balken = min/max NH ₃ 10-Min., hellblau = Lufttemperatur, orange = Niederschlagsdauer)	11
Abbildung 13: Tagesmittel der NH ₃ -Konzentration mit min/max der 10-Minutenmittelwerten, Lufttemperatur, sowie Tages-Niederschlagsdauer im Monat März 2021. Die feuchte und kühle Witterung begünstigt tiefere NH ₃ -Konzentrationen. (Farben analog Abbildung 12)	12
Abbildung 14: Polarplot der Ammoniakkonzentration für den Monat März 2022.	13
Abbildung 15: Polarplots der NH ₃ 10-Minutenmittelwerte (Windrichtung, -geschwindigkeit ws, NH ₃ -Konzentration) über die gesamte Messdauer von 2021 bis 2022. Bei höheren Windgeschwindigkeiten (4-8 m/s)	

werden vor allem aus Nordost erhöhte NH_3 -Konzentrationen gemessen. Zwei Hotspot im Norden und Südosten zeigen sich bei mittleren Windgeschwindigkeiten (2-4 m/s). Bildmitte = Standort miniDOAS. Es wurde beim Polarplot kein grösserer Unterschied zwischen Tag und Nacht festgestellt und daher hier alle Zeiten gemeinsam gemittelt. 14

Abbildung 16: Belastungskarte Ammoniak. Der linke Ausschnitt (46 km x 46 km) zeigt die überregionale NH_3 -Belastung und der rechte Ausschnitt (8 km x 8 km) die regionale Belastung (Rasterung: 500 m x 500 m; farbiges Kreuz in Bildmitte = Standort miniDOAS) 15

Abbildung 17: Horizontale Ammoniakfracht über die gesamte Messdauer von 2021 bis 2022. In dieser Darstellung sind die Ammoniakfrachten am Tag und in der Nacht dargestellt 16

Abbildung 18: Aufsummierte horizontale Frachten als potenziell verfügbares Ammoniak für die Deposition (hellgrau = Lücken wegen fehlender Daten) 16

Abbildung 19: Kaltluftabflüsse im Gebiet des Robenuserriets. Das linke Bild zeigt die Ausgangslage der potenziellen Quellen (A-H, Z) und den Messstandort des miniDOAS (mD). Das mittlere Bild zeigt die Ausdehnung nach 1 Stunde des Einsetzens der Kaltluftabflüsse und das rechte Bild nach 7 Stunden. (modelliert mit KALOS) 17

Abbildung 20: Messinfrastruktur: miniDOAS (rechts), Meteoanlage (Bildmitte) und NH_3 -Passivsammler (links). Ganz rechts im Bild (30 m Abstand rechts) ist der Reflektorspiegel des miniDOAS. 19

Abbildung 21: Beispiel einer Offset-Bestimmung, hier nach dem Wechsel eines Umlenkspiegels. Idealerweise bewegen sich die Differenzwerte regelmässig um den Mittelwert (rote Linie) des Zeitabschnitts, in welchem der Offset gilt. (x-Achse = Seriennummer NH_3 -Passivsammler; y-Achse = Differenz zwischen miniDOAS und NH_3 -Passivsammler) 20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typisierung der Messstandorte 4

Tabelle 2: Messstandorte: Bezeichnung, Koordinaten, Messmittel und Messintervall an (Min. = Minuten, Wo = Wochen), Messdauer vom 29.01.2021 bis 31.01.2023 4

Literaturverzeichnis

Eidegenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) 2014: Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Bern. 62 S.

Kupper, T., Häni, Chr., Bretscher, D., Zaucker, F., 2022: Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020, Berner Fachhochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 104 S.

Seitler E., Meier M., 2023: Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2022. FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, 90 S.

Sintermann, J., Dietrich, K., Häni, C., Bell, M., Jocher, M., and Neftel, A.: A miniDOAS instrument optimised for ammonia field measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2721–2734, <https://doi.org/10.5194/amt-9-2721-2016>, 2016