

Ammoniakemissionen aus einem Güllelager

**Bericht Messperiode 2015-2018
Ungedecktes und gedecktes Lager**

**Im Auftrag des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Kanton Zürich**

Thomas Kupper, Christoph Häni

Berner Fachhochschule Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften,
Zollikofen

14. November 2018

Inhalt

Zusammenfassung	4
1. Ausgangslage und Zielsetzung	5
2. Material und Methoden	7
2.1 Versuchsstandort	7
2.1.1 Güllelagerbehälter ohne Abdeckung	7
2.1.2 Güllelagerbehälter mit Abdeckung	8
2.2 Versuchsanordnung und Datenerhebung	9
2.2.1 Messung der Ammoniakkonzentrationen	9
2.2.2 Messung von meteorologischen Parametern	9
2.2.2.1 Anordnung der Messgeräte	9
2.2.2.2 Interpolation fehlender Werte zur Niederschlagsmenge	10
2.2.3 Weitere Parameter	10
2.3 Berechnung der Ammoniakemissionen und Datenbearbeitung	11
2.3.1 Einleitung	11
2.3.2 Emissionsberechnung auf Basis der Profilmessungen (IHF-Methode)	12
2.3.3 Extrapolation der Emission anhand eines Skalierungsansatzes	13
2.4 Evaluation der Wirksamkeit der Abdeckung für die Reduktion der NH ₃ Emissionen	14
2.4.1 Emissionsrelevante Einflussgrößen	14
2.4.2 Kategorisierung von hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen vergleichbarer Zeitperioden	14
2.4.3 Regressionsanalyse	16
2.4.4 Strömungssimulation des Luftaustausches	16
3. Resultate und Diskussion	17
3.1 Übersicht	17
3.2 Zeitliche Abdeckung der Messkampagne durch verwendbare miniDOAS Messewerte	17
3.2.1 Ohne Abdeckung des Lagerbehälters	17
3.2.2 Mit Abdeckung des Lagerbehälters	18
3.3 Betrieb des Güllelagerbehälters	18
3.4 Dauer bis zur Ausbildung einer Schwimmschicht nach Rühren der Gülle	20
3.5 Herleitung der Emissionen anhand des Skalierungsansatzes	22
3.6 Ammoniakemissionen	24
3.6.1 Ungedeckter Lagerbehälter	24
3.6.2 Abgedeckter Lagerbehälter	29
3.6.3 Wirksamkeit der Abdeckung für die Reduktion der Ammoniakemissionen	31
3.6.3.1 Direkter Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und abgedeckten Lagerbehälter basierend auf den hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen identischen Kategorien	31
3.6.3.2 Evaluation der Emissionsreduktion aufgrund der Abdeckung mittels Regressionsanalyse ..	35
3.6.3.3 Gemessene Emissionsminderung im Vergleich zu Daten aus der Literatur	36
4. Schlussfolgerungen und Ausblick	38
5. Dank	39
6. Literatur	40

7. Anhang	43
7.1 Gesamtschweizerische Ammoniakemissionen 2010	43
7.2 Betrieb des Güllelagerbehälters	44
7.3 Gemessene Höhe der Schwimmschicht auf der Gülleoberfläche	47
7.4 Vorliegen einer Schwimmschicht auf der Gülleoberfläche	49
7.5 Nährstoffanalysen der Gülle.....	49
7.6 Direkter Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und abgedeckten Lagerbehälter basierend auf den hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen identischen Kategorien	50
7.7 Ammoniakemissionen des Güllelagers in Abhängigkeit der wichtigen Einflussgrößen	53
7.7.1 Übersicht.....	54
7.7.2 Einfluss der Schwimmschicht auf die Emissionen des Güllelagers	59
7.7.2.1 Emissionen vom Güllelager mit und ohne Schwimmschicht	59
7.7.2.2 Emissionen vom Güllelager bei unterschiedlichem Füllstand	61
7.7.3 Niederschlag	62
7.7.4 Temperatur	64
7.7.5 Windgeschwindigkeit	66
7.7.6 Emissionen bei Befüllung von oberhalb der Gülleoberfläche und von unterhalb der Gülleoberfläche	68
7.7.7 Ereignisse mit hohen Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter	68
7.8 Strömungssimulation des Luftaustausches am offenen und abgedeckten Lager unter ausgesuchten Szenarien	75

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer (HAFL) verantwortlich.

Zusammenfassung

Ammoniak (NH_3) aus der Landwirtschaft trägt wesentlich zum Eintrag von reaktivem Stickstoff in die Umwelt bei, was vielfältige negative Auswirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität, Boden, Wasser, die menschliche Gesundheit sowie die Klimaerwärmung hat. Güllelagerbehälter sind wesentliche Quellen von Ammoniakemissionen. Mittels Abdeckung offener Lager ist eine deutliche Emissionsminderung möglich. NH_3 -Emissionen aus der Lagerung von Gülle sind relativ gut untersucht. Die meisten Daten basieren aber auf Studien im Pilot- und Labormassstab, welche die sehr komplexen Vorgänge bei der Bewirtschaftung eines Güllelagers in der Praxis nur bedingt abbilden können. Die vorliegende Studie hat zum Ziel, NH_3 -Emissionen von einem Lager für Rindviehgülle unter Praxisbedingungen zu messen und erstmals die Emissionsminderung aufgrund der Installation einer teilschwimmenden Folie als Abdeckung zu untersuchen. Dazu lagen NH_3 -Emissionsdaten einer umfangreichen, über insgesamt mehr als drei Jahre dauernden Messreihe vor, welche eine fundierte Untersuchung der vorliegenden Fragestellung ermöglichten.

Die Kampagne vom ungedeckten Lagerbehälter 2015-2017 zeigte über alle Jahreszeiten gemittelte Emissionen von $0.07 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Die maximalen Werte erreichten rund $1.5 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Die gemessenen Emissionen sind gut vergleichbar mit Daten aus Studien unter Umweltbedingungen oder aus Pilotanlagen. Die Emissionen vom abgedeckten Lager der Messkampagne 2017-2018 lagen über alle Jahreszeiten gemittelt bei $0.05 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Maximum: $0.46 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Eine Emissionsreduktion von 46% aufgrund der eingesetzten teilschwimmenden Abdeckung liess sich eindeutig belegen. Dieser Wert liegt im Bereich der Wirksamkeit von andern emissionsmindernden Techniken wie beispielsweise dem Schleppschlauchverteiler. In Perioden mit hohem Emissionspotential, also bei Trockenwetter und fehlender Schwimmschicht, lag die Emissionsminderung mit bis zu rund 80% deutlich höher. Werte aus der Literatur zur Emissionsreduktion für vollständig schwimmende Folien betragen rund 60% bis 80%. Beobachtete Differenzen zur hier untersuchten teilschwimmenden Abdeckung sind teilweise auf die Öffnung in der Mitte und am Rand sowie den Luftraum zwischen Gülleoberfläche und Folie bzw. den dadurch ausgelösten Luftaustausch an der emittierenden Oberfläche zurückzuführen. Dies wird durch Simulationen des Luftaustausches am offenen Lager und mit der teilschwimmenden Abdeckung untermauert. Es gibt zudem Hinweise, dass die emissionsmindernde Wirkung von Abdeckungen in Labor- und Pilotstudien aufgrund der methodischen Rahmenbedingungen überschätzt wird.

Die vorliegende Untersuchung hat bestätigt, dass eine intakte Schwimmschicht die Emissionen reduziert. Inwieweit eine solche vorliegt, hängt massgeblich von der Durchmischung des Behälters mittels Rührwerk ab. Die Messungen beim ungedeckten Lagerbehälter haben gezeigt, dass in der Regel frühestens rund 14 Tage nach einem Rührereignis wieder eine intakte Schwimmschicht mit emissionsmindernder Wirkung vorhanden ist, d.h. eine Schicht mit einer Höhe von mindestens 10 cm. Infolge der 48 Rührvorgänge beim ungedeckten Behälter wies dieser nur während 59% der Messperiode eine intakte Schwimmschicht auf. Ein Grossteil dieser Zeit lag im Winterhalbjahr. Obwohl die Zeit ohne Schwimmschicht lediglich 41% des Jahres umfasste, wurden dabei 62% der totalen Jahresemission produziert. Der grosse Anteil der Zeit ohne Schwimmschicht und das dann vorliegende hohe Emissionspotential zeigen, dass eine Schwimmschicht eine Abdeckung nicht ersetzen kann. Zudem ist bei diesen Bedingungen die emissionsmindernde Wirkung der Abdeckung hoch. Dies dürfte umso mehr für Schweinegülle oder separierte Gülle zutreffen, die eine geringere Schwimmschichtbildung aufweisen.

Im Hinblick auf eine Optimierung der Emissionsminderung von Güllelagerabdeckungen sollte geprüft werden, ob Systeme mit einem niedrigeren Austausch mit der Umgebungsluft möglich sind. Eine Verminderung der Rührvorgänge würde weiter zu einer Emissionsreduktion beitragen.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Die Ammoniakemissionen aus Landwirtschaft, Verkehr, Industrie/Gewerbe, Abfallbewirtschaftung und Haushalte bilden zusammen mit den Stickoxid-Emissionen aus der Verbrennung fossiler und biogener Brenn- und Treibstoffe die wichtigsten Quellen von reaktiven Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre. Diese werden über unterschiedlich grosse Distanzen verfrachtet, nehmen an chemischen Reaktionen in der Atmosphäre teil und werden schliesslich in ihrer ursprünglichen oder in umgewandelter Form über die verschiedenen Depositionspfade in Böden und Oberflächengewässer eingetragen. Sie haben vielfältige negative Auswirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität, Boden, Wasser, die menschliche Gesundheit (Feinstaub) sowie die Klimaerwärmung (Sutton et al., 2011). So tragen reaktive Stickstoffverbindungen beispielsweise wesentlich zur Versauerung und Eutrophierung von naturnahen Ökosystemen bei (z.B. Wälder, Hochmoore, artenreiche Naturwiesen), was sich auf Vegetation und Fauna negativ auswirkt.

Ammoniak (NH_3) verursachte im Jahr 2010 in der Schweiz rund zwei Drittel der Emissionen von reaktivem Stickstoff (N) (Menzi et al., 2014). Davon stammten 92% aus der Landwirtschaft, was 48.3 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ entspricht (Kupper et al., 2015; 1 kt = 1000 t). Innerhalb der Landwirtschaft stammte der weitaus grösste Teil, nämlich 90%, aus der Tierproduktion (43.5 kt $\text{NH}_3\text{-N}$). 4.8 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ wurden dem Pflanzenbau zugeordnet, was 10% der landwirtschaftlichen Ammoniakemissionen entspricht. Mit 33.9 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ und 6.5 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ trugen die Kategorien Rindvieh und Schweine am stärksten zu den Emissionen aus der Tierproduktion bei (78% bzw. 15% des Totals der Tierproduktion; Abbildung 1, links). Die Ausbringung von Gülle bildete die wichtigste Emissionsstufe innerhalb der Tierproduktion mit einem Anteil von 36% der Emissionen, was 15.6 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ entspricht, gefolgt von der Stufe Stall/Laufhof (34% Anteil, 14.9 kt $\text{NH}_3\text{-N}$; Abbildung 1, rechts; vgl. auch Anhang 7.1). Die Lagerung von Gülle und die Ausbringung von Mist trugen als drittgrösste Quelle je 10% bzw. 4.4 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ zu den Emissionen bei. Die Lagerung von Mist und die Weide wiesen einen Anteil von 7% bzw. 3% (2.9 bzw. 1.2 kt $\text{NH}_3\text{-N}$) der Emissionen der Tierproduktion auf.

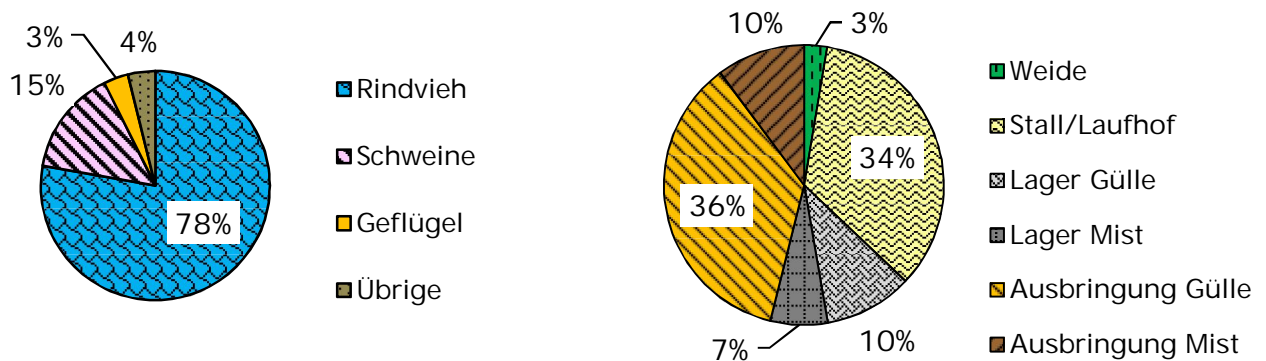


Abbildung 1: Anteile der einzelnen Tierkategorien an den Emissionen aus der Tierproduktion in Prozent (übrige Tierkategorien: Pferde und andere Equiden, Kleinwiederkäuer, andere Raufutter verzehende Nutztiere: Bisons, Dam- und Rothirsche Lamas, Alpakas) (links). Anteile der Emissionsstufen an den Emissionen aus der Tierproduktion in Prozent (rechts). (Quelle: Kupper et al., 2013).

Schweizweit kann man von ca. 4500 bis 5500 offenen Güllelagerbehältern ausgehen. Ihr Inhalt dürfte zwischen 2.5 und 3 Mio. m^3 betragen, was einem Anteil von rund 15% des totalen Lagervolumens entspricht. Die Abdeckung von Güllelagern ist eine anerkannte Technik zur Reduktion von Ammoniakemissionen aus offenen Behältern (UNECE, 2014). Die Emissionsminderung ist vor allem auf die Verminderung des Luftaustauschs an der emittierenden Oberfläche zurückzuführen (VanderZaag et al., 2008). Weiter beeinflusst die Abdeckung die Wirkung des Niederschlags und der Temperatur auf die Emissionen sowie die Ausbildung einer natürlichen Schwimmschicht.

Würden sämtliche offenen Lager abgedeckt, könnte gemäss Schätzung mittels des aktuell verwendeten Emissionsmodells Agrammon¹ das Total der landwirtschaftlichen Emissionen Schweizweit um rund 2% bzw. 1 kt NH₃-N reduziert werden. Andere wirksame Massnahmen führen zu einer vergleichbar hohen Emissionsminderung (Kupper, 2016; Tabelle 1). Um die maximale Menge an landwirtschaftlichen Emissionen von 25 kt NH₃-N zu erreichen (BAFU, BLW, 2016), ist eine Reduktion um rund 20 kt NH₃-N nötig. Daher sind Massnahmen zur Emissionsminderung auf allen Stufen erforderlich.

Die Kosten für eine Abdeckung mittels Schwimmfolie bzw. Zeltdach betragen gemäss UN-ECE (2014) 0.5 bis 2.5 Euro pro kg nicht emittierten NH₃-N. Für andere Massnahmen, z.B. Ställe für Schweine oder Geflügel liegen die Kosten meist im Bereich zwischen 5 und 15 Euro pro kg nicht emittierten NH₃-N.

Tabelle 1: Geschätzte Emissionsminderung einiger Beispiele von Massnahmen im Vergleich zum Stand der Emissionen von 2010 (Schätzungen basierend auf dem Modell Agrammon regional). Die Zahlen sind als Grössenordnung zu verstehen

Massnahme	Emissionsreduktion
Abdeckung aller offenen Güllesilos	1.0 kt NH ₃ -N
Maximaler Einsatz Schleppschlauchverteiler (70% der Güllemenge)	2.0 kt NH ₃ -N
Ausrüstung sämtlicher Geflügel- und Schweineställe mit einer Abluftreinigung (Bio- oder Chemowäscher)	2.5 kt NH ₃ -N
Ausrüstung sämtlicher Milchvieh- und Mutterkuhställe mit einem emissionsarmen Boden (z.B. Planbefestigter Boden mit 3% Quergefälle und Harnsammelrinne sowie Schieberentmistung mit Rinnenräumer)	1.5 kt NH ₃ -N
Verbesserte Fütterung Milchkühe	2.5 kt NH ₃ -N

Zur Verflüchtigung von NH₃ aus der Lagerung von Gülle ist eine Vielzahl von Studien verfügbar (VanderZaag et al., 2008; VanderZaag, et al., 2015). Allerdings basieren die meisten Untersuchungen auf Versuchen im Pilot- und Labormassstab. Es ist nicht ausreichend geklärt, inwieweit sich solche Messungen auf die Verhältnisse von realen Lagerbehältern übertragen lassen. Messungen unter Umweltbedingungen wurden aufgrund der grossen methodischen Schwierigkeiten und des Aufwands bisher nur wenig durchgeführt (Kupper, 2016).

In diesem Kontext hatte die vorliegende Studie zum Ziel, die Emissionen von einem Güllelagerbehälter (Rindviehgülle) zu bestimmen. In einem ersten Schritt wurden die Messungen am ungedeckten Behälter während rund zwei Jahren (2015-2017) durchgeführt. Der Lagerbehälter wurde im Frühjahr 2017 mit einer teilschwimmenden Folie abgedeckt. Anschliessend wurden die Messungen während eines weiteren Jahres fortgesetzt. Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, (i) die Emissionen vom nicht abgedeckten und vom abgedeckten Lagerbehälter zu messen, (ii) die Wirksamkeit der teilschwimmenden Abdeckung für die Reduktion der NH₃ Emissionen und (iii) den Einfluss wichtiger Einflussgrössen (Bewirtschaftung des Lagers, meteorologische Parameter) auf die Emissionshöhe zu beschreiben und zu quantifizieren.

¹ www.agrammon.ch

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsstandort

2.1.1 Güllelagerbehälter ohne Abdeckung

Der Güllelagerbehälter liegt in Tagelswangen, rund 70 m westlich von einem landwirtschaftlichen Betrieb (Abbildung 2). Es handelt sich um einen runden offenen Silo aus Email mit 21 m Durchmesser, 4,5 m Höhe und 1558 m³ Volumen. Die Gülle stammt von rund 100 Milchkühen, die in einem Boxenlaufstall mit Auslauf gehalten werden. Die Einstreue der Boxen besteht aus Kurzstroh. Die Böden von Auslauf und Laufgängen sind planbefestigt und mit einer Schieberentmischung ausgerüstet. Die Vollgülle wird in einer Vorgrube gesammelt und periodisch in den Lagerbehälter gepumpt (Abbildung 3). Seitlich verlaufen die Zulauf- und Ansaugleitungen über den Behälterrand. Auf der dem Zulauf gegenüberliegenden Seite befindet sich ein Propellerrührwerk.

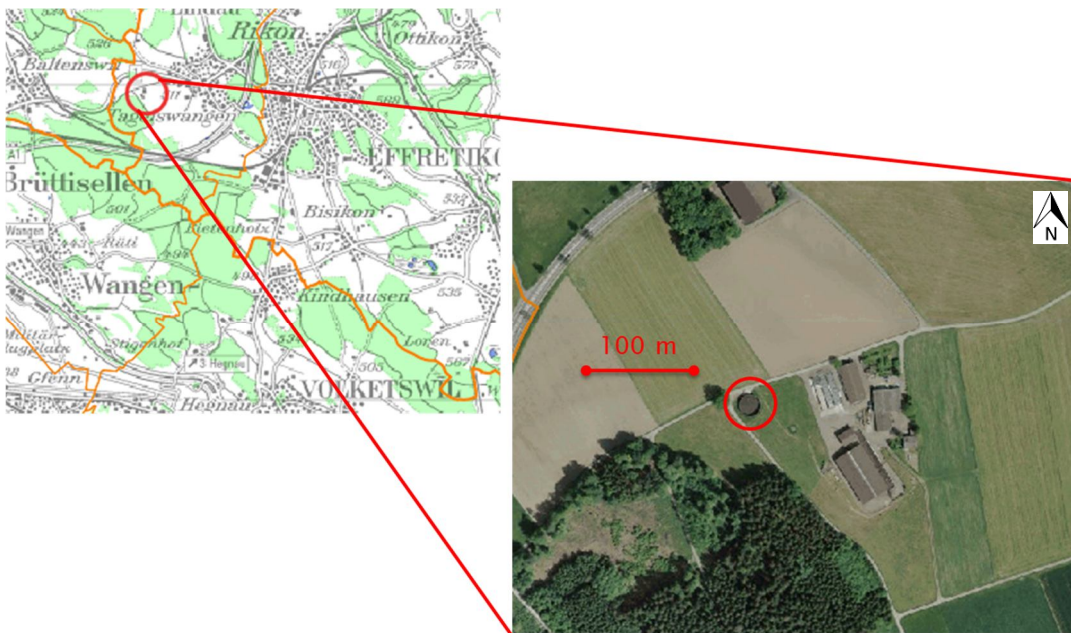


Abbildung 2: Lage des Güllelagerbehälters (roter Kreis) und des landwirtschaftlichen Betriebs.

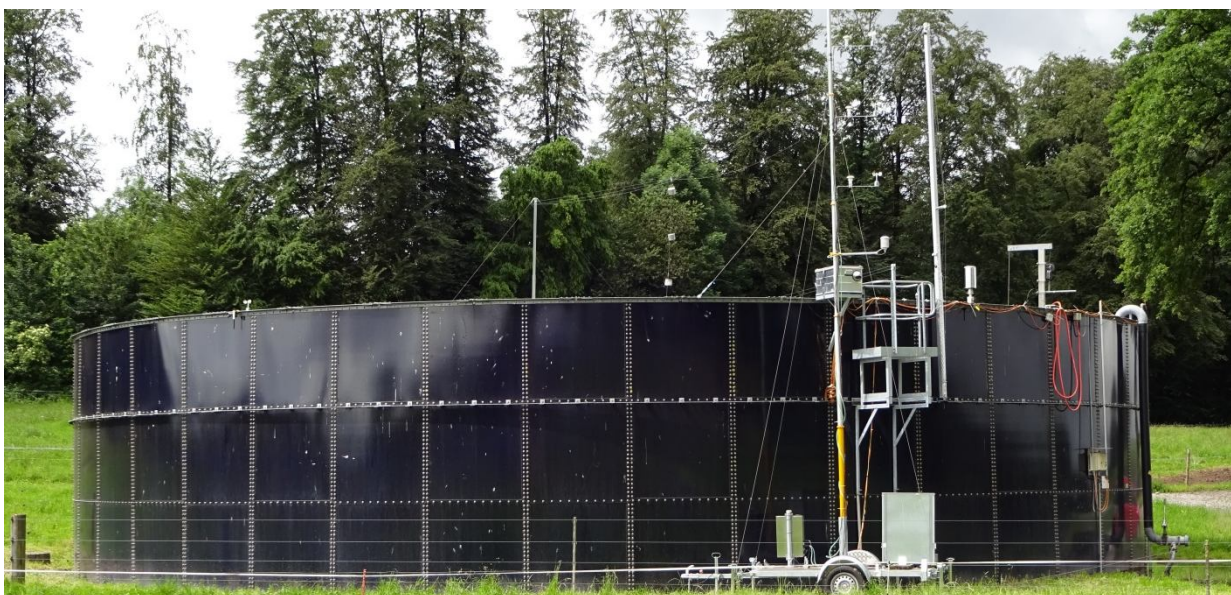


Abbildung 3: Nicht abgedeckter Güllelagerbehälter mit Messeinrichtungen, Ansicht von Osten her.

2.1.2 Güllelagerbehälter mit Abdeckung

Ende April 2017 wurde eine teilschwimmende Folie der Firma Kohli AG, Gisikon installiert (Abbildung 4). Die teilschwimmende Abdeckung besteht aus einer Folie, die gegen die Einwirkung von Gasen und UV-Strahlung beständig ist. Sie ist am äusseren Rand mit einem Chromstahlrohr verbunden und wird mit Spanngurten an der Silooberkante befestigt. Diese Konstruktion verhindert ein Verschieben der Folie beim Rühren oder aufgrund von Windwirkung. Die Folie hängt frei gegen das Silozentrum. Bei einem Füllstand des Behälters von 1 m und mehr liegt sie schwimmend auf der Gülleoberfläche. Für den nötigen Auftrieb sorgen eingeschweisste Schaumstoffkernbahnen. Im Zentrum der Folie befindet sich eine Öffnung von 4.5 m Durchmesser, welche für das ungehinderte Abfließen des Regenwassers und das Abrutschen des Schnees sorgt. Aufgrund der Öffnung in der Mitte bleiben ca. 4% der Gülleoberfläche unbedeckt. Für das Rührwerk sowie die ungefähr gerade gegenüber liegenden Zuleitungen sind zusätzlich entsprechende Öffnungen eingebaut².



Abbildung 4: Güllelager nach der Abdeckung mittels der teilschwimmenden Folie. Links bei hohem und rechts bei niedrigem Füllstand.

Schwimmfolien liegen normalerweise vollständig auf der Gülleoberfläche und decken die ganze Gülleoberfläche ab. Der vorliegende Typ wird unseres Wissens nur in der Schweiz verwendet. Dementsprechend liegen in der Literatur keine Messwerte vor. Die Ursachen für die vorliegende teilschwimmende Konstruktion mit Öffnung in der Mitte sind wie folgt: vollständig schwimmende Folien können sich durch Windeinwirkung verdrehen und aufgrund der daraus folgenden Scherkräfte zerreißen. Bei Bildung einer Schwimmschicht kleben die Feststoffe an der Unterseite der Folie. Das Einschalten des Rührwerks und die dadurch induzierten Rotationsbewegungen zerreißen die Folie. Aufgrund der erwähnten Erfahrungen wurden teilschwimmende Folien wie oben beschrieben eingeführt. Diese erfordern eine Öffnung im Zentrum an der tiefsten Stelle, um den Abfluss des Regenwassers und das Abrutschen von Schnee zu gewährleisten. Anfangs wurden diese Öffnungen klein gehalten (1.5 m; KOLAS, 2012). Es zeigte sich, dass festes Material auf die Folie überschwappte und sich in grösseren Mengen anlagerte. Bei der Leerung des Lagerbehälters rutschte dies nicht ab. Das Gewicht dieses Materials führte zum Bruch der Folie, sobald diese nicht mehr auf der Gülleoberfläche aufschwamm. Mit einer grösseren Öffnung, im vorliegenden Fall von 4.5 m Durchmesser, liess sich dieses Problem lösen³.

Von diesem Typ teilschwimmende Folien wurden schweizweit ca. 100 Stück installiert, was einem Anteil von 13% der Abdeckungen von Güllesilos entspricht (Kupper, 2016).

² Der Text dieses Abschnitts basiert auf der Beschreibung der Firma Kohli AG, Gisikon; URL: <http://www.kohliag.ch/portfolio-view/teilschwimmende-abdeckung/> (28.08.2018).

³ Der Text dieses Abschnitts basiert vorwiegend auf mündlichen Informationen von Herrn Michael Kohli, Firma Kohli AG, Gisikon sowie einem Erfahrungsbericht von Beat Reidy (HAFL Zollikofen) im Zusammenhang einem Schaden einer teilschwimmenden Folie mit kleiner Öffnung.

2.2 Versuchsanordnung und Datenerhebung

2.2.1 Messung der Ammoniakkonzentrationen

Die Messung der Ammoniakkonzentrationen über dem Lagerbehälter erfolgte mittels eines miniDOAS (Sintermann et al., 2016) auf der Höhe des oberen Rands des Lagerbehälters. Somit wurde die mittlere NH_3 -Konzentration linienintegriert erfasst. Zusätzlich wurde auf 4 Höhen in der Mitte des Lagerbehälters 1 m unterhalb sowie 1 m, 2 m und 3 m oberhalb des miniDOAS Strahls mit Passivsammlern (Thöni, Seitler, 2015) gemessen (Abbildung 5). Die Messzeitauflösung des miniDOAS betrug 200-500 ms. Die gemessenen Werte wurden auf 10 Minuten gemittelt. Die Expositionsdauer der Passivsammler belief sich auf eine Woche. Weiter wurde in rund 750 m Entfernung an einem Standort ausserhalb von Abluftfahnen von landwirtschaftlichen Betrieben die Hintergrundkonzentration von NH_3 mittels Passivsammlern gemessen (Expositionsdauer: 4 Wochen). Daten der Messungen mittels miniDOAS liegen für den ganzen Zeitraum von 30.01.2015 bis 28.05.2018 vor. Die Messungen mittels Passivsammlern decken den Zeitraum von 05.04.2016 bis 03.04.2018 ab.

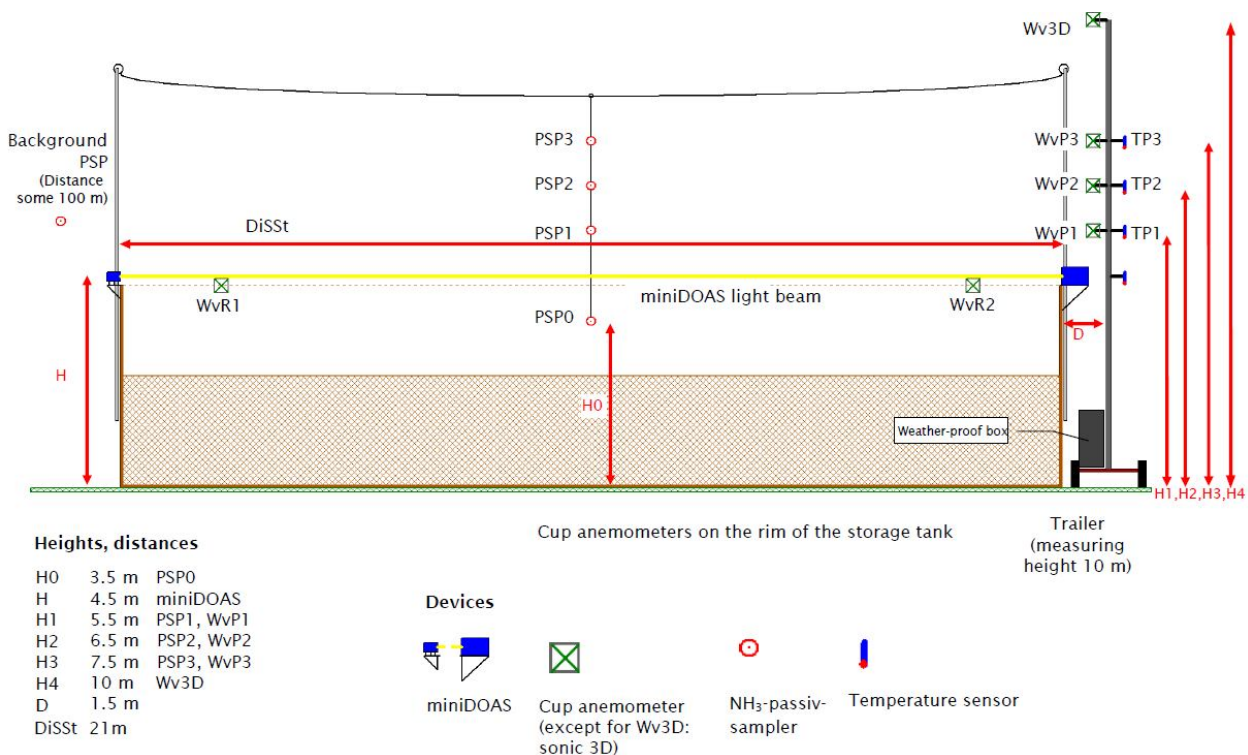


Abbildung 5: Messanordnung und Position der Messgeräte. Konzentrationsmessung NH_3 : miniDOAS, PSP0-PSP3: Passivsammler. Temperatur auf Messhöhen NH_3 -Messung: TP1-TP3; Temperatursensoren. Windgeschwindigkeit bzw. Turbulenz: WvP1-WvP3, WvR1-WvR2: Schalenanemometer; Wv3D: 3D Ultraschallanemometer. H0-H4: Höhe der Messgeräte ab Boden des Güllelagers; DiSt: Länge des miniDOAS Lichtstrahls.

2.2.2 Messung von meteorologischen Parametern

2.2.2.1 Anordnung der Messgeräte

Unmittelbar neben dem Lagerbehälter erfolgte die Messung des Windgeschwindigkeits-Profiles (Auflösung: 10 Minuten Mittelwerte) auf den gleichen Messhöhen wie die 3 Passivsammler oberhalb des miniDOAS mittels Schalenanemometer (Campbell Scientific, Abbildung 5). Die Geräte wurden an einem fahrbaren Meteomast montiert. In 10 m Höhe am Messmast war zusätzlich ein 3D Sonic Anemometer (WindMaster™Pro, Gill Instruments Limited, Ly-mington, UK) installiert. Zwei weitere Schalenanemometer waren in den Hauptwindrichtungen (W und E-ENE) auf der gleichen Höhe wie das miniDOAS bzw. auf dem Rand des Lagerbehälters aufgestellt. Weiter wurde mittels Temperatursensoren (Campbell Scientific), die

am Messmast montiert waren, auf den gleichen Messhöhen wie das miniDOAS bzw. die drei Passivsammler oberhalb des miniDOAS ein Temperatur-Profil (Auflösung: 10 Minuten Mittelwerte) erfasst. Mittels einer Wetterstation neben dem Lagerbehälter wurde zudem die Niederschlagsdauer erfasst. Weiter erfolgte die Messung der Niederschlagsmenge und der relativen Luftfeuchtigkeit am Meteomast auf 4.5 m Höhe. Diese Parameter lagen ebenfalls als 10-Minutenwerte vor.

2.2.2.2 Interpolation fehlender Werte zur Niederschlagsmessung

Da die Messung der Niederschlagsintensität einige Messlücken vor allem für die Messdauer ohne Abdeckung aufwies⁴ wurden die fehlenden Messwerte basierend auf Messungen von MeteSchweiz anhand einer Regression (R Funktion *glmTMB::glmTMB*, lineares Modell mit zero-inflation Modellierung) über die gesamte Messdauer (ohne & mit Abdeckung) abgeleitet. Die Stundenmittelwerte der Niederschlagsintensität beim Güllelager wurden anhand der Stundenmittelwerte der Stationen Dübendorf (NABDUE), Lindau (AGMLIN) und Nürensdorf (ZHNUR) (Abbildung 6) wie folgt interpoliert:

$$I_{1h_Lager} = P * (1 - p_0)$$

wobei

$$P = a_1 I_{1h_NABDUE} + a_2 I_{1h_AGMLIN} + a_3 I_{1h_ZHNUR} + a_4 I_{1h_NABDUE} I_{1h_AGMLIN} + a_5 I_{1h_NABDUE} I_{1h_ZHNUR} + a_6 I_{1h_ZHNUR} I_{1h_AGMLIN}$$

und

$$\log\left(\frac{p_0}{1 - p_0}\right) = b_1 I_{1h_NABDUE} + b_2 I_{1h_AGMLIN} + b_3 I_{1h_ZHNUR} + b_4 I_{1h_NABDUE} I_{1h_AGMLIN} + b_5 I_{1h_NABDUE} I_{1h_ZHNUR} + b_6 I_{1h_ZHNUR} I_{1h_AGMLIN} + b_7 I_{1h_NABDUE} I_{1h_ZHNUR} I_{1h_AGMLIN}$$

I_{1h_X} steht für die Stundenmittelwerte der Niederschlagsintensität in mm h^{-1} , wobei X für die Messung beim Lager (*Lager*), respektive bei den Messstationen Dübendorf (*NABDUE*), Lindau (*AGMLIN*) und Nürensdorf (*ZHNUR*) steht, und a_i und b_i sind die zugehörigen Regressionskoeffizienten. P steht für die Niederschlagsintensität beim Lager in mm h^{-1} , ohne Berücksichtigung der zero-inflation und p_0 steht für die Wahrscheinlichkeit, dass beim Lager aktuell kein Niederschlag stattfindet.

2.2.3 Weitere Parameter

An vier Daten (August 2016, März, Juni, Oktober 2017) wurde Gülle beprobt und der Gehalt der Trockensubstanz, organischen Substanz, pH, Gesamtstickstoff (N_{tot}), Ammonium (\approx löslicher Stickstoff TAN; engl.: „Total Ammoniacal Nitrogen“), Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel analysiert. An den ersten beiden Daten erfolgte die Probenahme vom ungedeckten und an den zwei letzteren vom abgedeckten Behälter. Dazu kam ab August 2016 eine periodische Messung der Schwimmschichthöhe. Dazu wurde ein speziell konstruiertes PVC-Rohr in die Schwimmschicht eingelassen. Sobald diese mit dem Rohr durchstoßen war, wurde am unteren Ende via eines im Rohr eingelassenen Schlauches ein Ballon aufgeblasen. Danach liess sich das Rohr bis ans untere Ende der Schwimmschicht anheben. Von oben wurde an einer Schnur eine Kippscheibe dem Rohr entlang auf die Schwimmschicht geschickt und durch Abkippen am Rohr fixiert. Nun wurde der Ballon entlüftet und das Rohr herausgezogen. Die Distanz zwischen der Kippscheibe und dem unteren Ende des Rohrs entspricht der Schwimmschichthöhe. Diese konnte auf einer Skala abgelesen werden.

⁴ Bei 31% der Messdauer ohne Abdeckung konnte eine direkte Messung der Niederschlagsintensität durchgeführt werden; zusätzlich: Messung ab 28.04.2016 mit einer grösseren Lücke von rund 100 Tagen zwischen dem 21.07.2016 und dem 28.10.2016.

Massnahmen zur Bewirtschaftung des Lagers (Durchmischen der Gülle, Befüllen und Entleeren des Lagerbehälters) wurden alle 10 Minuten mittels Bildaufnahmen durch eine Webcam erfasst und entsprechend gespeichert. Die Messung des Füllstands des Behälters erfolgte mittels Lasermessgerät (zeitliche Auflösung: 10 Minuten).

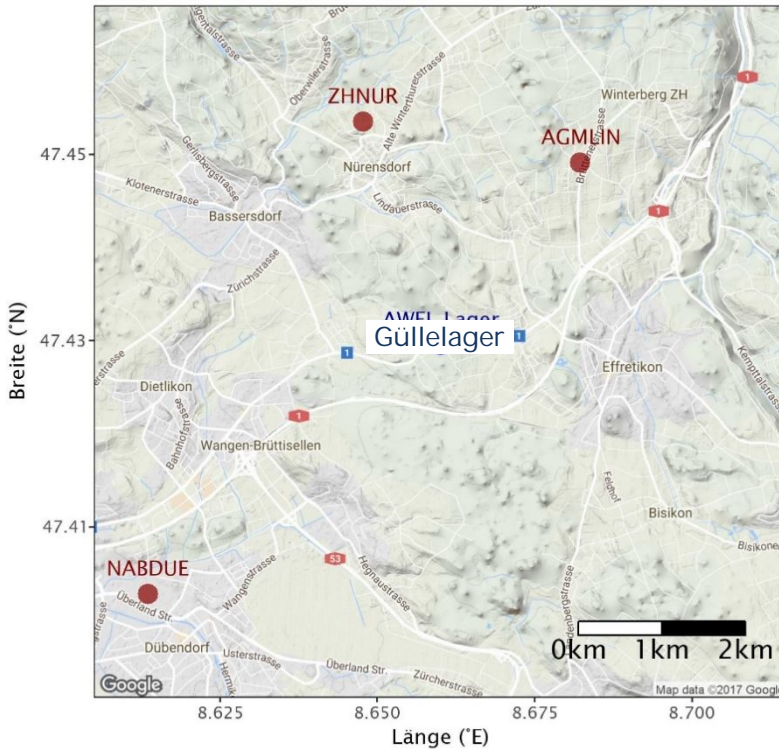


Abbildung 6: Umliegende MeteoSchweiz Messstationen, welche zur Extrapolation der Niederschlagsmenge beim Güllelager verwendet wurden. NABDUE: Messstation Dübendorf (Datenquelle: Bundesamt für Umwelt - BAFU); AGMLIN: Messstation Lindau (Agrometeo); ZHNUR: Messstation Nürensdorf (AWEL).

2.3 Berechnung der Ammoniakemissionen und Datenbearbeitung

2.3.1 Einleitung

Allgemein sind in der vorliegenden Situation verschiedene Methoden zur Emissionsbestimmung möglich: Massenbilanzmethoden (z.B. Kammermessungen oder die Messung der vertikal integrierten horizontalen NH_3 -Emission (IHF-Methode)), die Konzentration-Fluss-Verhältnis Methode ("Tracer-ratio", bekannte Emissionsrate eines Tracers inkl. gleichzeitiger Konzentrationsmessungen von Tracer und NH_3) oder Ausbreitungsmodellierung (z.B. Lagrangesche oder Eulersche Modelle mit generalisierter Monin-Obukhov Similarity Theory (MOST) Turbulenz, oder Koppelung dieser Modelle an komplexe Strömungsmodelle wie z.B. Large Eddy Simulation). Alle aufgezählten Methoden, mit Ausnahme der IHF-Methode, benötigen aufwändige experimentelle Messcharakterisierungen und Modellierungen, die in vorliegendem Fall mit vertretbarem Aufwand schwer realisierbar waren.

Die Zielsetzung des vorliegenden Experiments erfordert die Quantifizierung der Emissionsflüsse. Dazu wurden Vertikalprofile der NH_3 Konzentration mittels Passivsammlern im Wochenmittel und der Windgeschwindigkeit mittels Anemometern (im 10 Minutenmittel) gemessen. Auf der Grundlage dieser Informationen erfolgte die Berechnung einer wochengemittelten Emission (siehe Kap. 2.3.2). Um eine zeitlich hochaufgelöste Emissionsinformation (E_{DOAS}) zu generieren, wurde wie folgt vorgegangen. Sowohl die miniDOAS Messung (10 Minuten Mittelwert der Konzentration im miniDOAS Lichtstrahl, gemittelt über den Lagerquerschnitt) als auch die Windgeschwindigkeit (Messung auf 10 m) wurden auf Wochenmittel gemittelt und miteinander zu einem horizontalen Fluss multipliziert ($\text{HF}^*_{\text{DOAS}}$) (Abbildung

7). Dieser aus den miniDOAS Messungen abgeleitete Fluss wurde mit den Emissionen aus den Profilmessungen mittels linearer Regression in eine Beziehung gesetzt (siehe Kap. 2.3.3). Anhand dieser Regression und der 10-minütigen miniDOAS Konzentrations- und Windgeschwindigkeitsmessungen konnten 10-minütigen Emissionen E_{DOAS} hergeleitet werden.

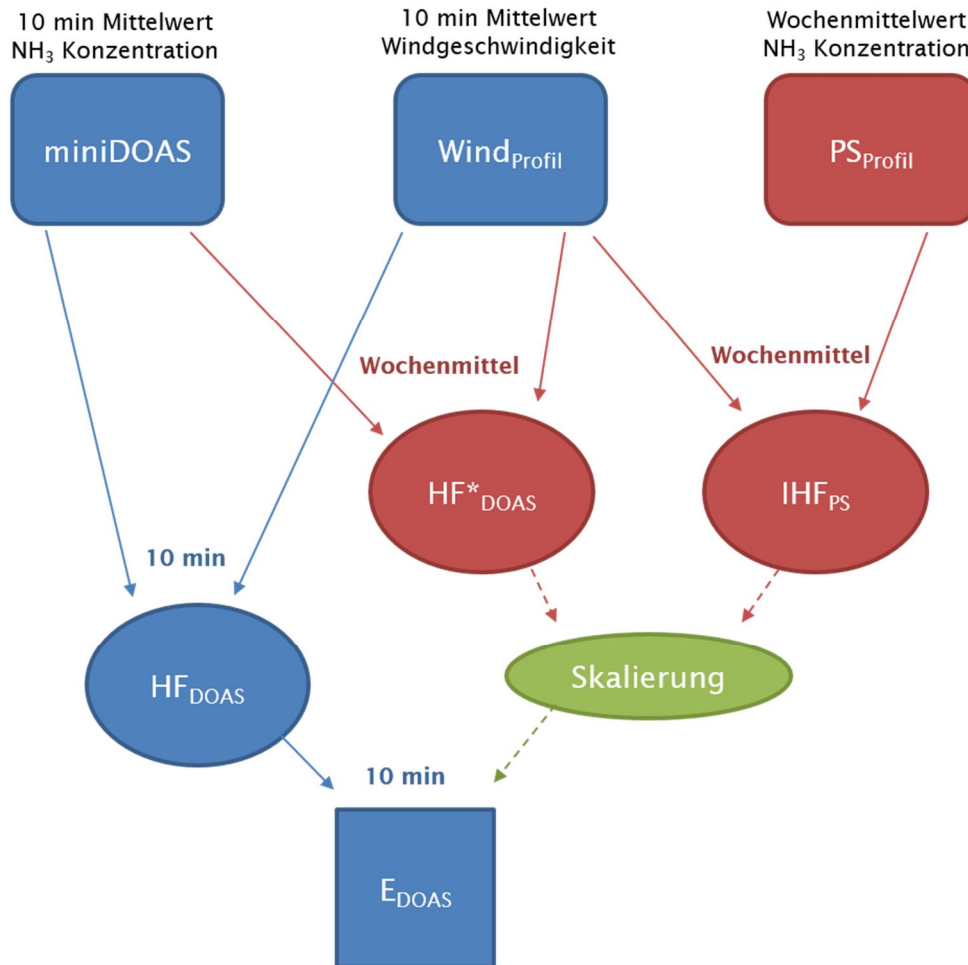


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Auswertungsschritte. $HF_{DOAS} = u_{10} \times c_{MD}$ auf 10 Minuten Basis, $HF^*_{DOAS} = u_{10} \times c_{MD}$ auf Wochenmittel Basis, wobei u_{10} für die Windgeschwindigkeit auf 10 m und c_{MD} für die miniDOAS (NH_3) Konzentration steht.

Die folgenden Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3 beschreiben die jeweiligen methodischen Ansätze und ihre Annahmen.

2.3.2 Emissionsberechnung auf Basis der Profilmessungen (IHF-Methode)

Die Berechnung der Ammoniakemissionen erfolgte mittels eines vereinfachten Massenbilanzansatzes, der IHF-Methode (IHF: Integrated Horizontal Flux; z.B. Denmead, 1983; Harper et al., 2011). Die IHF-Methode ist ein Ansatz, der einen verhältnismässig geringem Aufwand erfordert. Bei der IHF-Methode berechnet sich der Emissionsfluss (F_{NH_3}) einer Quellfläche aus der Integration des horizontalen Flusses über die vertikale Ausdehnung der durch die Quellfläche verursachten Gasfahne (Plume):

$$F_{NH_3} = \frac{1}{x} \int_{z_0}^{z_{pl}} U(C - C_{in}) dz \quad (1)$$

wobei x der Quellenausdehnung (in m) zwischen Konzentrationsprofil und Quellenrand entlang der mittleren Windrichtung entspricht. Die Grenzen des Integrals werden durch die Grenzen des Plume vorgegeben. Die untere Grenze z_0 (in m) entspricht der unteren Grenze des Plume, die obere Grenze z_{pl} (in m) der oberen Plumegrenze. Die Differenz $z_{pl} - z_0$ ist

somit die vertikale Ausdehnung des Plume. Die Profile der horizontalen Windgeschwindigkeit U (in m/s) und der gemessenen Konzentrationserhöhung gegenüber der Hintergrundbelastung $C - C_{in}$ (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) werden an einer geeigneten Stelle anhand mehrerer Punkt-Messungen (in der Realität zwischen 4 und 6 Messungen), welche über die vertikale Ausdehnung verteilt sind, angenähert. Die Profile der NH_3 -Konzentration und der Windgeschwindigkeit wurden hier auf 5 respektive 4 Höhen gemessen und wie folgt ergänzt:

- Die Windprofile (U) sowie die Konzentrationsprofile (C) wurden linear zwischen den Messhöhen interpoliert. Für die Interpolation des Konzentrationsprofils wurden nur die Passivsammler Messungen verwendet.
- Die NH_3 Konzentrationen auf z_{pl} über der Oberkante des Güllelagerbehälters $C(z=z_{pl})$ wurde gleich der Konzentration der Anströmung (C_{in}) bzw. gleich der Hintergrundkonzentration (Kap. 2.2.1) gesetzt. z_{pl} wurde aus der Profilform der Passivsammlermessungen auf einen mittleren Wert zwischen 9-10 m abgeleitet. Für die Berechnung wurde $z_{pl} = 9.5$ m verwendet.
- Die Grenzen des Windprofils $z(U=0)$ und $U(z=9.5\text{m})$ wurden mittels „Monotone Piecewise Cubic Interpolation“ bestimmt (Fritsch, Carlson, 1980). Die untere Grenze des Integrals z_0 wurde schlussendlich aus dem Wert $z(U=0)$ und der Höhe des mittleren Füllstands gemittelt.

Die IHF-Methode basiert auf den folgenden Annahmen: sie ist unabhängig von der Windrichtung, sofern in der Mitte der Quellfläche gemessen wird und die Quellstärke radialsymmetrisch identisch ist (z.B. Kreisfläche mit homogener Emission). Im Falle einer Profilmessung in der Mitte einer Kreisfläche lässt sich sicherstellen, dass die Messung der Konzentration unabhängig der Windrichtung erfolgt und die Quellenausdehnung x lässt sich durch den Kreisradius R ersetzen.

Im vorliegenden Fall wird die Annahme getroffen, dass die Anwendung der IHF Methode mit Wochenmittelwerten eine ausreichende Annäherung an die mittlere Emission für diesen Zeitraum ergibt.

2.3.3 Extrapolation der Emission anhand eines Skalierungsansatzes

Die Bestimmung der NH_3 Emissionen wurde mit einem Skalierungsansatz ergänzt und auf 10-Minuten Intervalle, respektive auf Zeiten ohne Passivsammlermessungen extrapoliert (vgl. Kap. 2.2.1). Diese Methode liefert qualitative Resultate der Emissionsverläufe anhand einer einfachen Skalierung des Produktes der Windgeschwindigkeit und der NH_3 Konzentration (HF_{DOAS}) mit der NH_3 Emission.

Die 10-minütigen miniDOAS Konzentrationen sowie die Windgeschwindigkeitsmessung auf 10 m wurden auf Passivsammler-Zeitbasis gemittelt und zu dem Produkt $\text{HF}_{\text{DOAS}}^* = u_{10}C_{MD}$ verrechnet. Die aus den Profilen (IHF-Methode) berechneten Emissionsflüsse (F_{IHF}) wurden anhand robuster linearen Regression in Relation zum Produkt $u_{10}C_{MD}$ gesetzt.

Bei der Anwendung des Skalierungsansatzes wird vorausgesetzt, dass der horizontale Fluss gemittelt über die Messstrecke des miniDOAS (d.h. auf der Höhe des Silorandes), mit der tatsächlichen Emission skaliert. Dies ist der Fall, wenn der Gesamtfluss durch den advektiven Anteil (u^*c) (genügend stark) dominiert wird, d.h. die Summe der turbulenten Anteile ($\overline{u'c'} + \overline{w'c'}$) unabhängig des Zustandes der Dispersion (d.h. unabhängig der Stabilität und der Windgeschwindigkeit) vernachlässigt werden kann. Für den Skalierungsansatz wurde nicht unterschieden, ob die Windrichtung vertikal zur, oder entlang der miniDOAS Messstrecke verlief.

Eine weitere Annahme ist, dass die Konzentration im miniDOAS Lichtstrahl (über den Lagerquerschnitt) als repräsentativ für die Emissionsverteilung im Lagerquerschnitt angesehen

hen werden kann. D.h., die gemessene miniDOAS Konzentration sollte möglichst unabhängig von der Windrichtung sein. Dies bedeutet, dass sich die Konzentration über dem Lagerquerschnitt ausgehend von der Mitte radial-symmetrisch verteilen sollte.

2.4 Evaluation der Wirksamkeit der Abdeckung für die Reduktion der NH₃ Emissionen

2.4.1 Emissionsrelevante Einflussgrößen

Die Emissionen hängen stark vom Vorhandensein einer Schwimmschicht (v.a. Höhe der Schwimmschicht, von der Schwimmschicht bedeckter Anteil der Gülleoberfläche) und von den meteorologischen Bedingungen (Niederschlag, Temperatur, Windgeschwindigkeit) ab. Die Schwimmschicht wird durch Rühren der Gülle und/oder Befüllen des Behälters ganz oder teilweise zerstört. Regen vermindert die Emissionen. Mit zunehmender Temperatur und Windgeschwindigkeit nehmen die Emissionen zu (vgl. auch Anhang 7.7.1). Die Schwierigkeit der vorliegenden Versuchsanordnung besteht nun darin, dass die Messung der Emissionen vom ungedeckten und von gedeckten Lagerbehälter nicht gleichzeitig und daher nicht unter identischen Bedingungen hinsichtlich der wichtigen Einflussgrößen stattfinden konnten. Um trotzdem einen Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und gedeckten Lagerbehälter durchführen und die aufgrund der Abdeckung erreichte Emissionsreduktion quantifizieren zu können, wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt:

- Definition von Kategorien, welche hinsichtlich der oben aufgeführten für die Emissionshöhe relevanten Einflussgrößen vergleichbar sind. Innerhalb jeder von diesen Kategorien wurden die mittleren Emissionen vom ungedeckten und vom abgedeckten Lagerbehälter berechnet. Der Vergleich der Emissionshöhe zwischen identischen Kategorien von nicht abgedeckten und abgedeckten Lagerbehälter erlaubt die Bestimmung der Emissionsreduktion aufgrund der Abdeckung. Das Vorgehen zur Generierung dieser Kategorien wird in Kap. 2.4.2 beschrieben.
- Evaluation der Emissionsreduktion aufgrund der Abdeckung mittels Regressionsanalyse (Kap. 2.4.3).

Die Resultate dieser beiden Ansätze, genannt „Direkter Vergleich der Emissionen von ungedeckten und abgedeckten Lagerbehälter basierend auf den hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen identischen Kategorien“ und „Evaluation der Emissionsreduktion aufgrund der Abdeckung mittels Regressionsanalyse“ sind in Kap. 3.6.3.1 bzw. 3.6.3.2 dargestellt. Diese beiden Ansätze wurden ebenfalls verwendet, um den Einfluss der wichtigen Größen Schwimmschicht und meteorologische Bedingungen wie oben aufgeführt auf die Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter zu charakterisieren und quantifizieren. Die Resultate dazu sind in Anhang 7.7 aufgeführt.

2.4.2 Kategorisierung hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen vergleichbarer Zeitperioden

Wie in Kap. 2.4.1 ausgeführt wurden Kategorien definiert, welche hinsichtlich der oben aufgeführten, für die Emissionshöhe relevanten Einflussgrößen vergleichbar sind. Der Begriff „Kategorie“ ist demnach wie folgt definiert: Zeitperiode (= n 10-Minutenintervalle), während der Emissionen gemessen wurden, welche hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen vergleichbar sind. Aufgrund der Einteilung nach Einflussgrößen kann man davon ausgehen, dass Emissionswerte innerhalb einer Kategorie bzw. identischen Kombinationen von Einflussgrößen gleich hoch sein sollten. Die Emissionen innerhalb einer Kategorie wurden arithmetisch gemittelt. Die Kategorien wurden entsprechend der Kriterien von Tabelle 2 gebildet.

Tabelle 2: Aufteilung der Kategorien nach Einflussgrössen

Einflussgrösse	Aufteilung zur Mittelung der Emissionswerte	n*	Aggregierte Aufteilung für Darstellung und Interpretation	n*
a1) Zeit nach Rührereignis	0 – 50d in Gruppen von 1d >50d	51	0 – 24h 1 – 14d > 14d ⁵	3
a2) Füllstand	0.0 – 4.5 m in Gruppen von 0.5 m	9	≤1 m >1 m	2
b) Niederschlag/ Niederschlagsintensität	0 mm h ⁻¹ < 2 mm h ⁻¹ 2 – 10 mm h ⁻¹	3	0 mm h ⁻¹ < 2 mm h ⁻¹ 2 – 10 mm h ⁻¹	3
c) Lufttemperatur	-15 – 40 °C in Gruppen von 5 °C	11	≤ 10 °C > 10 °C	2
d) Windgeschwindigkeit	0 – 12 m s ⁻¹ in Gruppen von 0.5 m s ⁻¹	24	≤ 1 m s ⁻¹ > 1 m s ⁻¹	2
Total	-	363'528		72

*n= Anzahl Kategorien

Zur Veranschaulichung wird hier beispielhaft die Generierung einer „Kategorie x“ und die Berechnung der dazu gehörenden Emissionen beschrieben.

Generierung der „Kategorie x“:

a1) Zeit nach Rührereignis: 0 – 24h

a2) Füllstand: 0.5 m bis 1 m

b) Niederschlag/Niederschlagsintensität: 0 mm h⁻¹

c) Lufttemperatur: -5 °C bis 0 °C

d) Windgeschwindigkeit: 0.5 m s⁻¹ bis 1 m s⁻¹

Berechnung der Emissionen von „Kategorie x“:

Für alle 10-Minuten Intervalle mit vorhandenen Messresultaten wurden die Emissionswerte von „Kategorie x“ arithmetisch gemittelt. Dies erfolgte sowohl für die Messperiode des ungedeckten bzw. für die Messperiode des gedeckten Lagerbehälters.

Für die Bildung der Kategorien wie oben beschrieben wurde die Aufteilung der Einflussgrössen entsprechend der Spalte „Aufteilung zur Mittelung der Emissionswerte“ in Tabelle 2 verwendet. Diese Aufteilung ergibt 363'528 Kategorien. Für die Darstellung und Interpretation der Resultate wurden die mittleren Emissionen der 363'528 Kategorien auf 72 Kategorien aggregiert. Die Aufteilung dieser Kategorien ist in der Spalte „Aggregierte Aufteilung für Darstellung und Interpretation“ in Tabelle 2 aufgeführt. Diese 72 Kategorien bilden die Grundlage für die Datenanalyse und die Darstellung der Resultate von Kap. 3.6.3.1.

Das Vorgehen zur Generierung der Kategorien für die Analyse der Ammoniakemissionen des ungedeckten Güllelagers in Abhängigkeit der wichtigen Einflussgrössen gemäss Anhang 7.7 ist grundsätzlich gleich. Die Aufteilung der Einflussgrössen in Kategorien ist nicht vollständig identisch mit derjenigen wie beschrieben in Tabelle 2 und wird daher in Anhang 7.7.1 bzw. Tabelle 27 separat beschrieben.

⁵ Vgl. dazu Kap. 3.4

2.4.3 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse setzt die NH₃ Emission in Relation zu den fünf oben aufgeführten Einflussgrößen. Dafür wurde eine log-lineare Abhängigkeit zwischen der Emission und den Parametern angenommen:

$$\log_{10}(E_{NH_3}) = X_{ZnR} * (X_N + X_{Fst} + T_{4.5m} + \log_{10}(U_{10m}))$$

Die unabhängigen Variablen sind gegeben durch die Zeit nach Durchmischung der Gülle im Lager (in der Folge genannt: „Rührereignis“) X_{ZnR} (0-24h, 1-14d und >14d nach Rühren), der Niederschlagsintensität X_N (0 mm h⁻¹, <2 mm h⁻¹ und 2-10 mm h⁻¹), dem Füllstand X_{Fst} (≤1 m und >1 m), der Temperatur auf Höhe Silorand $T_{4.5m}$ (in °C) und dem Logarithmus mit Basis 10 der Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe U_{10m} (in m s⁻¹). Die Transformation der abhängigen Variable E_{NH_3} (NH₃ Emission in g m⁻² h⁻¹) anhand des Logarithmus mit Basis 10 führt dazu, dass sich die unabhängigen Variablen multiplikativ zur NH₃ Emission verhalten, d.h. die Werte aus dem Potenzieren der Schätzwerte (Koeffizienten) mit Basis 10 können somit zu relativen Änderungen ungerechnet werden (siehe Spalte 'Relativer Effekt' bzw. RelEff_ohne und RelEff_mit in Tabelle 13).

2.4.4 Strömungssimulation des Luftaustausches

Die in vorliegender Untersuchung gewählten Ansätze zur Bestimmung der Emissionen und der Reduktionswirkung durch die teilschwimmende Abdeckung sind rein empirisch. Dabei lassen sich systematische methodische Unsicherheiten nicht umfassend quantifizieren. Um die empirischen Untersuchungen durch Prozess-basierte Berechnungen zu ergänzen und somit einen weiteren Plausibilisierungs- und Erklärungsschritt zu unternehmen, wurde eine CFD-Strömungssimulation am untersuchten Lager für ausgewählte Szenarien durchgeführt. So konnte der Prozess des Luftaustausches am offenen und abgedeckten Lager isoliert betrachtet und seine Rolle für die Emissionen verstanden werden. Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Analyse der empirischen Messungen am Lager. Die Methodik und Ergebnisse der Strömungsmodellierung sind im Anhang 7.8 ergänzt (kurz zusammengefasst bestätigen die Simulationen die wesentlichen Erkenntnisse der Messungen und liefern einen zusätzlichen Plausibilisierungsschritt).

3. Resultate und Diskussion

3.1 Übersicht

Die Resultate der Untersuchungen werden im vorliegenden Kapitel wie folgt präsentiert:

- Zuerst zeigt Kap. 3.2, wieviel gültige NH₃ Messwerte im Rahmen der Messkampagnen ohne und mit Abdeckung generiert werden konnten.
- Aufgrund der grossen Bedeutung des Betriebs des Lagerbehälters (Rühren, Befüllen, Entleeren) auf die Emissionen und auch, weil solche Grössen bisher in der Literatur kaum beschrieben wurden, wird dieses Thema im Kap. 3.3 behandelt. Der Betrieb des Lagerbehälters hat grosse Auswirkungen auf die Ausbildung einer natürlichen Schwimmschicht, welche sich ihrerseits stark auf die Emissionen auswirkt. Wichtige Ergebnisse zur Dauer der Ausbildung einer natürlichen Schwimmschicht werden in Kap. 3.4. vorgestellt.
- Die Skalierung der Emissionen aus den miniDOAS Daten, welche die Grundlage zur Bestimmung der Emissionen bildet, wird im Kap. 3.5 vorgestellt.
- Die eigentlichen Resultate des Versuchs (Kap. 3.6), die Emissionen vom ungedeckten und vom gedeckten Lagerbehälter sind Gegenstand der Kapitel 3.6.1 und 3.6.2.
- Der direkte Vergleich der beiden Messkampagnen, mit welchem die aufgrund der Abdeckung erreichte Emissionsminderung quantifiziert wird, folgt in Kap. 3.6.3. Dazu wurden zwei unterschiedliche Ansätze verwendet: ein „Direkter Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und gedeckten Lagerbehälter basierend auf den hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrössen identischen Kategorien“ (Kap. 3.6.3.1) und eine „Evaluation der Emissionsreduktion aufgrund der Abdeckung mittels Regressionsanalyse“ (Kap. 3.6.3.2).

Die Prozesse zur Generierung der Resultate und deren Verknüpfung bis zur Beschreibung der erreichten Emissionsminderung sind sehr komplex. Um die Resultate ausreichend zu belegen und den Bericht gleichzeitig schlank und übersichtlich zu halten, wurden die zugrundeliegenden Daten und Analysen in den Anhang verschoben mit entsprechenden Verweisen im Text. Dazu gehört auch die detaillierte Untersuchung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Emissionshöhe (Vorhandensein einer Schwimmschicht, v.a. Höhe der Schwimmschicht, und meteorologische Bedingungen: Niederschlag, Temperatur, Windgeschwindigkeit). Die Resultate davon werden vor allem anhand der Messkampagne vom ungedeckten Lagerbehälter im Anhang 7.7 präsentiert.

3.2 Zeitliche Abdeckung der Messkampagne durch verwendbare miniDOAS Messewerte

3.2.1 Ohne Abdeckung des Lagerbehälters

Auswertbare Messdaten vom nicht abgedeckten Lagerbehälter waren vom 30. Januar 2015 bis am 18. April 2017 verfügbar (insgesamt 809.4 Tage). Über die ganze Messkampagne waren 87.7% der Messdauer durch gültige NH₃ Messwerte (d.h. Stundenmittelwerte mit einer zeitlichen Abdeckung von mehr als 75% = 45 min) abgedeckt. Der Anteil fehlender Daten ist im Sommer höher (Abbildung 8 und Tabelle 3). Dies ist auf eine nicht einwandfrei funktionierende Kühlung des miniDOAS zurückzuführen, welche bei hohen Temperaturen zu Messausfällen führte.

Tabelle 3: Anteil verwendbarer miniDOAS Konzentrationen für die Messdauer ohne Abdeckung.

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
2015	6%	89%	98%	89%	100%	100%	48%	62%	85%	99%	88%	78%
2016	100%	96%	80%	89%	84%	82%	83%	69%	66%	95%	100%	98%
2017	85%	93%	89%	54%	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2.2 Mit Abdeckung des Lagerbehälters

Die Messkampagne vom abgedeckten Lager dauerte vom 2. Mai 2017 bis zum 28. Mai 2018 (insgesamt 391.7 Tage). Gültige NH₃ Messwerte lagen für 98.2% der Messdauer vor (Tabelle 4).

Tabelle 4: Anteil verwendbarer miniDOAS Konzentrationen für die Messdauer mit Abdeckung.

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
2017	-	-	-	-	95%	92%	91%	97%	100%	98%	100%	100%
2018	100%	99%	100%	100%	90%	-	-	-	-	-	-	-

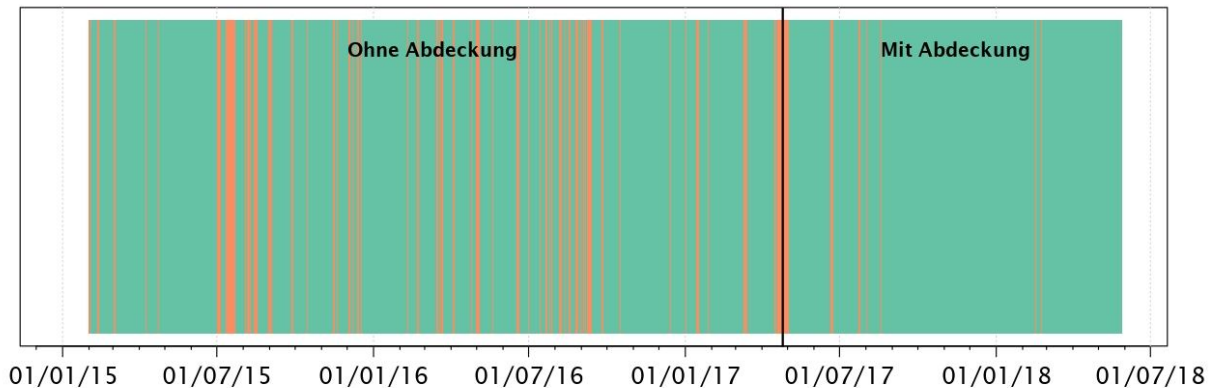


Abbildung 8: Zeitliche Abdeckung der Messkampagne durch verwendbare miniDOAS Messwerte: blau hinterlegter Bereich. Datenlücken sind rot eingezeichnet.

3.3 Betrieb des Güllelagerbehälters

Die Höhe der Emissionen wird unter anderem vom Zustand der Gülleoberfläche beeinflusst (Misselbrook et al., 2005). Diese wiederum hängt stark vom Befüllen des Behälters und vom Rühren der Gülle mittels Rührwerk ab. Möglicherweise spielt auch das Abpumpen von Gülle aus dem Lagerbehälter eine Rolle. Bei einer schwachen Ausbildung einer Schwimmdecke kann auch Turbulenz an der Oberfläche ausgelöst durch Wind einen Einfluss auf die Emissionshöhe haben. Das Einpumpen der Gülle erfolgte vom 30. Januar 2015 bis am 16. Mai 2016 von oben, d.h. die Gülle wurde von der Höhe des oberen Behälterrandes auf die Gülleoberfläche eingeleitet. Am 17. Mai 2016 (7h50) erfolgte der Einbau eines Tauchrohrs, welches entlang der Behälterwand zum Boden des Silos führte, so dass die Gülle unterhalb der Gülleoberfläche zugegeben werden konnte. Diese Anordnung entsprach den Empfehlungen der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft (BAFU, BLW, 2011). Da die Gülle im Tauchrohr im Januar 2017 gefror, wurde dieses am 30. Januar 2017 (9h40) entfernt. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende der Messkampagne erfolgte die Befüllung des Behälters wieder von oben über den Behälterrand. Von Mitte März 2016 bis Mai 2016 war das Rührwerk infolge eines Defekts nicht in Betrieb.

Insgesamt war das Rührwerk beim Güllelager ohne Abdeckung an 48 Tagen in Betrieb, davon an 21 Tagen im Jahr 2015, an 20 Tagen im Jahr 2016 und an 7 Tagen im Jahr 2017 (bis 18.04.2017). Nach der Montage der Abdeckung lief das Rührwerk im Jahr 2017 (ab 02.05.2017) an 17 Tagen, woraus für das Jahr 2017 ein Total von 24 Tagen mit Betrieb des Rührwerks resultierte. Im Jahr 2018 lief das Rührwerk an 10 Tagen (bis am 28.05.2018) (Tabelle 5). Im Mittel über die Jahre 2015 bis 2018 wurde das Güllelager rund 2 Mal pro Monat aufgerührt. Gemäss Kupper et al. (2015) wurden 2010 in der Schweiz 13% bzw. 16% der Güllelager bis zu 2 Mal pro Monat bzw. bis zu 4 Mal pro Jahr oder häufiger durchgemischt. Die übrigen Betriebe durchmischten die Güllelager weniger häufig, d.h. maximal 1 Mal pro

Monat (im Jahr 2015 war die Bewirtschaftung der Güllelager Schweizweit diesbezüglich ähnlich; Kupper et al., in Vorbereitung). Das in der vorliegenden Studie untersuchte Güllelager wurde demnach überdurchschnittlich oft durchmischt.

Tabelle 5: Häufigkeit der Aktivitäten Rühren und Befüllen (Anzahl, n und Stunden, h) während der Messkampagne beim Güllelagerbehälter ohne bzw. mit Abdeckung

	ohne Abdeckung				mit Abdeckung			
	Rühren		Befüllen		Rühren		Befüllen	
	n	h	n	h	n	h	n	h
2015*	21	73h00	25	94h30	-	-	-	-
2016	20	75h50	38	71h40	-	-	-	-
2017**	7	29h00	10	16h00	17	57h00	28	36h30
2018***	-	-	-	-	10	69h20	16	21h50
Total ohne Abdeckung	48	177h50	73	182h10	-	-	-	-
Total mit Abdeckung	-	-	-	-	27	126h20	44	58h20

*Start der die Messkampagne ohne Abdeckung: 30.01.2015

**Die Messkampagne ohne Abdeckung dauerte bis am 18.04.2017, diejenige mit Abd. startete am 02.05.2017

***die Messkampagne mit Abdeckung dauerte bis am 28.05.2018

Die Betriebsdauer des Rührwerks beim Lager ohne Abdeckung betrug total 177h50 und beim Lager mit Abdeckung 126h20. Bezogen auf ein Jahr, ergibt sich damit eine Dauer von rund 70 h bis knapp 100 h (Tabelle 5).

Befüllen des Behälters ohne Abdeckung kam an 73 Tagen und mit Abdeckung an 44 Tagen vor. Die Dauer der Befüllung betrug total 182h10 (ohne Abdeckung), 58h20 im Jahr 2015, 71h40 im Jahr 2016 und 16h00 im Jahr 2017*. Im Mittel dauerten ein Rührvorgang 3h40 und eine Befüllung 2h30 ohne Abdeckung bzw. 4h40 und 1h20 mit Abdeckung.

Die Verteilung der Aktivitäten Rühren, Entleeren und Befüllen innerhalb eines Tages ist in Abbildung 9 dargestellt. Rühren findet hauptsächlich tagsüber zwischen 6h00 und ca. 18h00 statt. Entleeren weist eine ähnliche Verteilung über den Tag auf. Diese beiden Aktivitäten hängen mit dem Ausbringen von Gülle zusammen, welche überwiegend innerhalb dieses Zeitfensters durchgeführt wird. Befüllen ist zeitlich weniger gleichmässig über den Tag verteilt mit einem klaren Peak am Vormittag nach 8h00. Die Verteilung der Aktivitäten stimmen für das nicht abgedeckte und das abgedeckte Lager weitgehend überein. Weitere Angaben zum Betrieb des Güllelagerbehälters sind im Anhang 7.2 und in Abbildung 11 aufgeführt.

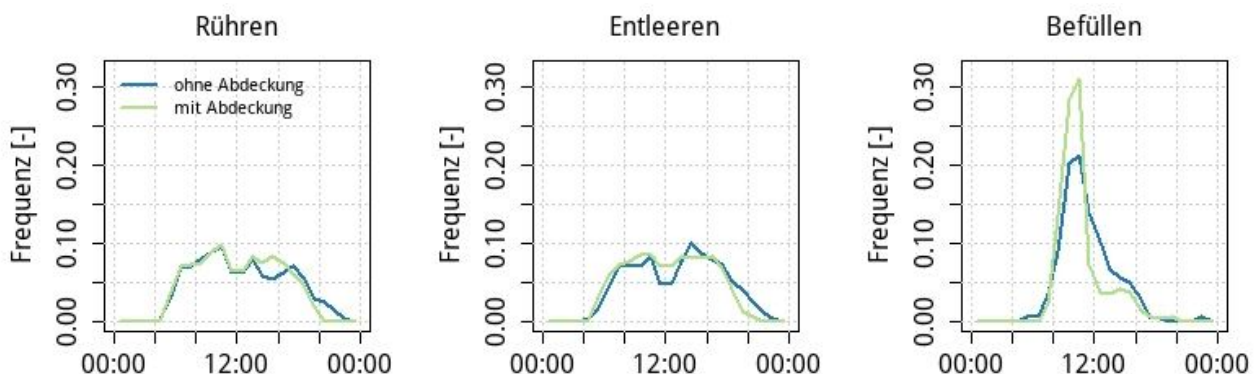


Abbildung 9: Tagesgang der verschiedenen Aktivitäten Rühren, Entleeren und Befüllen des Güllelagerbehälters ohne und mit Abdeckung.

Der Füllstand im Güllelagerbehälter ohne Abdeckung lag im Mittel bei 1.4 m (Bereich zwischen Minimum und Maximum: 0.2 bis 4.1 m, wobei im Winter und im Frühjahr grössere Werte auftraten (Abbildung 10). Mit Abdeckung betrug der Mittelwert 1.2 m und der Bereich

zwischen Minimum und Maximum: 0.1 bis 3.7 m. Die Werte stimmen damit für die beiden Messperioden ohne bzw. mit Abdeckung relativ gut überein.

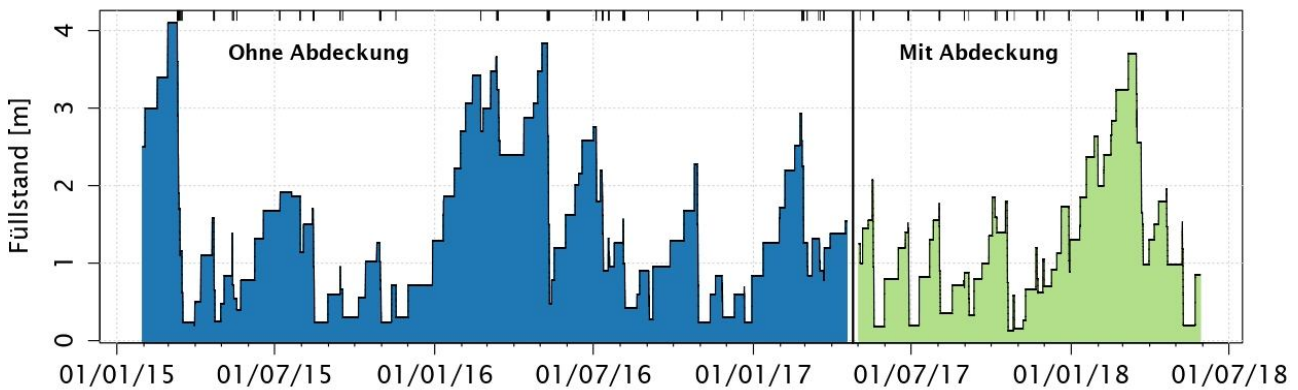


Abbildung 10: Füllstand von Gülle im Lagerbehälter (in m) in der Zeitperiode ohne Abdeckung. Schwarze Linien am oberen Rand der Grafik kennzeichnen einzelne Rührereignisse.

3.4 Dauer bis zur Ausbildung einer Schwimmschicht nach Rühren der Gülle

Die Bildung einer Schwimmschicht wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Entscheidend ist unter anderem der TS-Gehalt. Mit ansteigendem TS-Gehalt nimmt die Bildung einer Schwimmschicht zu. Unterhalb von 1% TS bildet sich keine Schwimmschicht (Misselbrook et al., 2005). Basierend auf Misselbrook et al. (2005) und Wood et al. (2012) kann man davon ausgehen, dass die Bildung einer Schwimmschicht bei einem TS-Gehalt der Gülle von $\geq 4\%$ begünstigt wird. Die Gülleanalysen (Tabelle 22, Anhang 7.5) weisen darauf hin, dass diese Bedingung während der Messperiode grösstenteils erfüllt ist.

Es ist weiter davon auszugehen, dass Rühren der Gülle die Schwimmschicht zerstört, was zu höheren Ammoniakemissionen führt. Aufgrund von Beobachtungen beim untersuchten Behälter ohne Abdeckung (mündl. Mitteilung R. Eugster, AWEL) und Angaben aus der Literatur (Misselbrook et al., 2005) dauert es rund 2 Wochen, bis sich eine gut ausgebildete Schwimmschicht bildet. Bei Vorhandensein von Stroh wurde nach 12 bis 28 Tagen eine Schwimmschicht beobachtet (Aguerre et al. (2012)). Andere Studien geben eine längere Zeitdauer an (De Bode, 1991; Wood et al., 2012). Gemäss Misselbrook et al. (2005) bewirkt erst eine Schichthöhe von mehr als 10 cm eine merkliche Emissionsminderung. Die Höhe (Dicke) der Schwimmschicht wurde vom 30. August 2016 an periodisch gemessen. Insgesamt standen 31 Messwerte bzw. 30 Messwerte zur Schichthöhe vom Behälter ohne Abdeckung bzw. mit Abdeckung zur Verfügung

In 7 Fällen war bei der Messung des Behälters ohne Abdeckung keine Schwimmschicht vorhanden. Im Mittel wurde 6.3 Tage vor der Messung gerührt (Tabelle 6). In zwei Fällen war selbst nach 10 Tagen keine Schwimmschicht vorhanden. In diesen beiden Fällen betrug der Füllstand im Behälter 0.3 bzw. 0.6 m. Die Ausbildung einer Schwimmschicht von mindestens 10 cm Höhe erforderte im Mittel 31 Tage. In 4 Fällen reichten dazu weniger als 14 Tage, nämlich 4.6, 11 und 12 Tage (in 2 Fällen) aus. Von 17 Messungen mit einer Schwimmschichthöhe von mindestens 10 cm war diese in 4 Fällen innerhalb von weniger als 14 Tagen, nämlich im Mittel nach 10 Tagen ausgebildet.

Aufgrund dieser Messungen wurden die Zeiträume innerhalb von 14 Tagen nach einer Durchmischung des Lagerbehälters als frei von einer Schwimmschicht definiert. Bei mehr als 14 Tagen nach Durchmischung wurde davon ausgegangen, dass eine mindestens 10 cm dicke Schwimmschicht ausgebildet ist. Die gemessenen Höhen der Schwimmschicht sind in Tabelle 19 und Tabelle 20, Anhang 7.3 aufgeführt. Die Zeitperioden (P) mit und ohne Schwimmschicht auf der Gülleoberfläche des Güllelagers ohne Abdeckung zeigt Tabelle 21, Anhang 7.4.

Abbildung 11 stellt die Messwerte der Schwimmschicht, die Rührereignisse und den Füllstand dar. Dabei zeigt sich, dass nach einem Rührereignis jeweils eine nur schwach ausgebildete Schwimmschicht vorlag, wenn gleichzeitig der Füllstand niedrig war. Eine Schwimmschicht von mehr als 10 cm Höhe bildete sich in den meisten Fällen nur bei einem Füllstand von mindestens 1 m. Basierend auf Misselbrook et al. (2005) und Wood et al. (2012) kann man die Bildung durch Verdunstung an der Oberfläche und den Transport von Partikeln an die Oberfläche erklären. Eine zunehmende Tiefe des Güllelagers fördert die Schwimmschichtbildung, da sich mit zunehmender Tiefe die Menge an Partikeln pro Flächeneinheit vergrössert.

Tabelle 6: Anzahl Tage seit dem letzten Rühren bis zur Ausbildung einer Schwimmschicht gemäss Messungen vom ungedeckten Lager. Die gemessenen Schwimmschichthöhen sind in die folgenden 6 Kategorien unterteilt: 0 cm, >0 bis <10, ≥10 bis <15 cm, ≥15 bis <20 cm, ≥20 cm, ≥10 cm.

	0 cm	>0 - <10 cm	≥10 - <15 cm	≥15 - <20 cm	≥20 cm	≥10 cm
Anzahl Messungen	7	7	3	5	9	17
Anzahl M. < 14 Tage*	7	3	2	1	1	4
Mittelwert Tage	6.3	15	14	25	41	31
Minimum Tage	1.5	3.4	4.6	11	12	4.6
Maximum Tage	10	24	25	39	62	62

*Anzahl Messungen innerhalb von weniger als 14 Tagen nach dem letzten Rührereignis

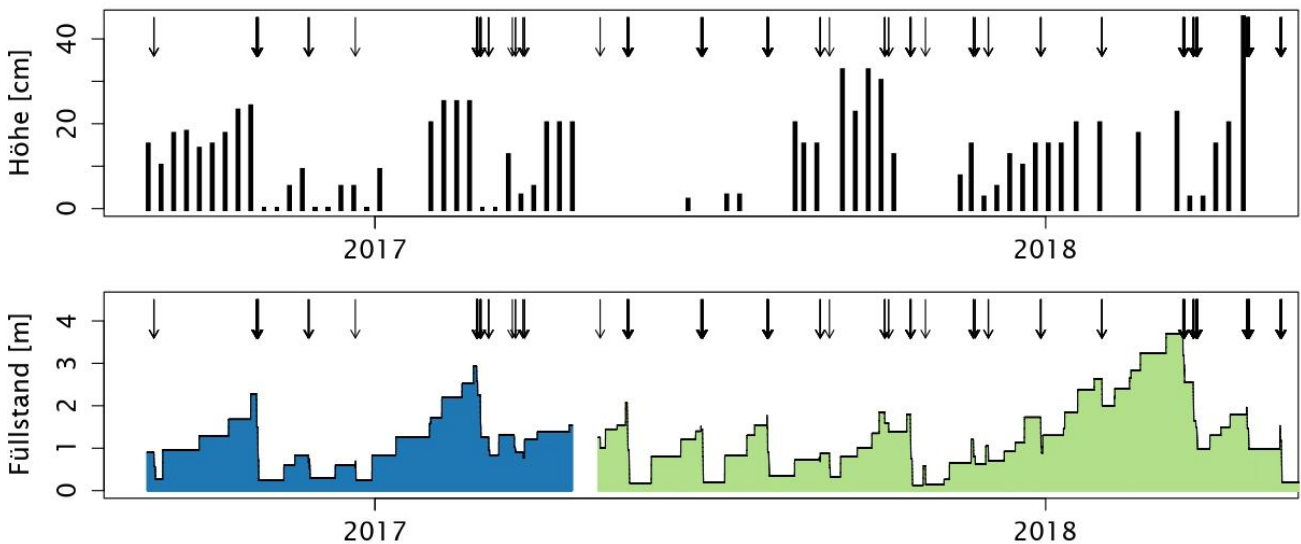


Abbildung 11: Höhe der Schwimmschicht in cm (1 Messung alle 7 Tage ab 30.08.2016) oben und Füllstand des Güllelagers in m unten. Pfeile kennzeichnen einzelne Rührereignisse. Bei 3 Messungen im Januar 2017 war die Schwimmschicht gefroren, weshalb eine Messung der Schwimmschichthöhe nicht möglich war.

Die Messungen zeigen, dass nach einem Rührereignis eine nicht-lineare Abnahme der Emissionen nach einem Rührereignis erfolgt (Abbildung 12). Dies zeigt sich vor allem beim nicht abgedeckten Lagerbehälter. Die Höhe der Emission ist nicht ausschliesslich durch die Wirkung der Schwimmschicht gegeben, da die meteorologischen Einflussgrössen ebenfalls eine Rolle spielen. Dennoch zeigt der Trend, dass die emissionsmindernde Wirkung der Schwimmschicht mit der Zeit zunimmt. Man kann demnach wie oben ausgeführt davon ausgehen, dass im Mittel nach 14 Tagen nach einem Rührereignis eine Schwimmschicht von mindestens 10 cm Höhe ausgebildet ist, welche die Emissionen merklich vermindert. Die Emissionsreduktion steigt weiter an mit zunehmendem zeitlichem Abstand zum letzten vorgängigen Rührereignis. Deshalb erfolgten die Datenanalyse bzw. die Bildung von Kategorien gemäss Kap. 2.4.2 aufgelöst in Gruppen von einem Tag bis zu 50 Tage und für grösser als 50 Tage nach einem Rührereignis. Dies ergibt ein Total von 51 Kategorien.

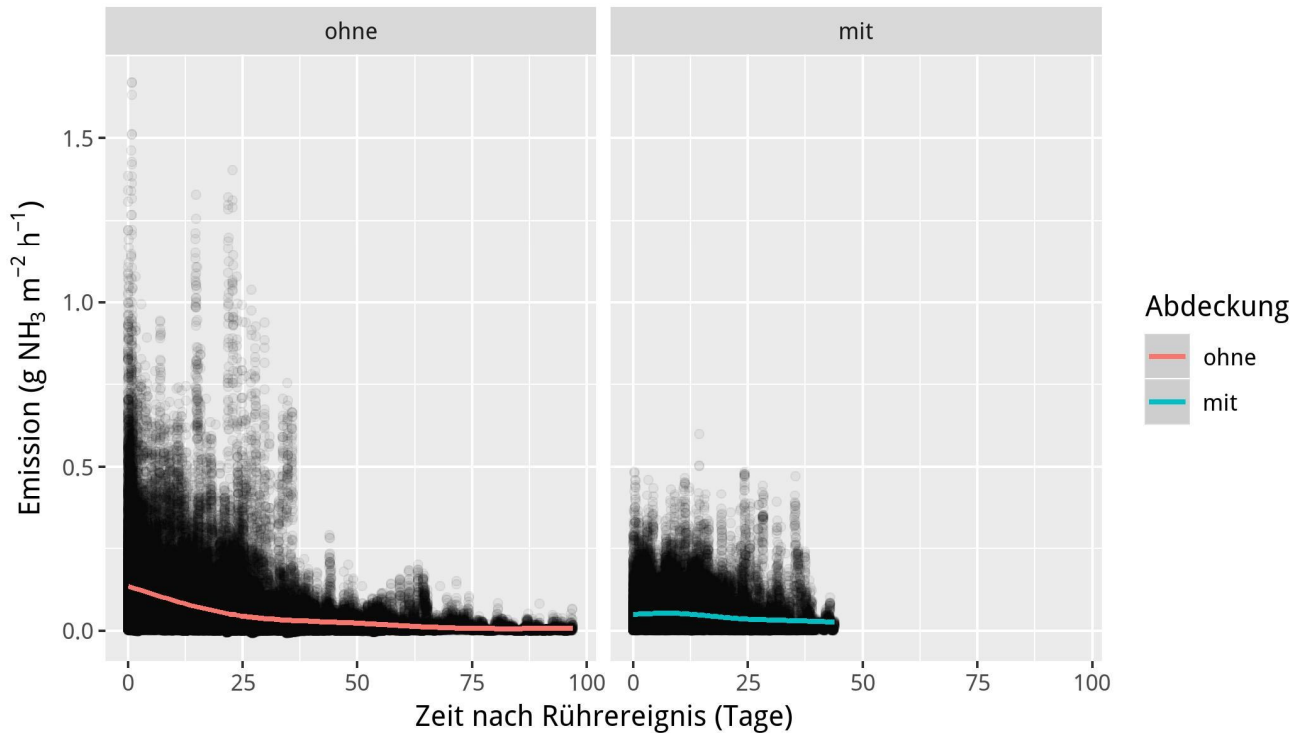


Abbildung 12: NH₃ Emissionen (g NH₃ m⁻² h⁻¹) vom Lagerbehälter ohne Abdeckung (links) und mit Abdeckung (rechts) in Abhängigkeit der Zeit nach einem Rührereignis. Die Punkte zeigen die einzelnen Messwerte und die rote bzw. die blaue Linie den Mittelwert.

3.5 Herleitung der Emissionen anhand des Skalierungsansatzes

Die Regressionsanalyse mit F_{IHF} als abhängige Variable und dem Produkt $u_{10}c_{MD}$ als unabhängige Variable zeigte eine lineare Abhängigkeit der beiden Variablen, welche durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

$$\text{Ohne Abdeckung:} \quad F_{IHF} = 1.99 \cdot 10^{-6} + 4.78 \cdot 10^{-4} \cdot u_{10}c_{MD} \quad (2)$$

$$\text{Mit Abdeckung:} \quad F_{IHF} = -6.16 \cdot 10^{-4} + 4.42 \cdot 10^{-4} \cdot u_{10}c_{MD} \quad (3)$$

wobei F_{IHF} der Emissionsfluss in g NH₃ m⁻² h⁻¹, u_{10} die Windgeschwindigkeit (m s⁻¹) gemessen auf 10 m und c_{MD} die NH₃ Konzentration in µg m⁻³ gemessen mittels miniDOAS sind (Abbildung 13). Die Achsenabschnitte erhalten somit die Einheiten g NH₃ m⁻² h⁻¹, die Koeffizienten von $u_{10}c_{MD}$ entsprechend die Einheiten (g NH₃ m⁻² h⁻¹)/(µg NH₃ m⁻² s⁻¹).

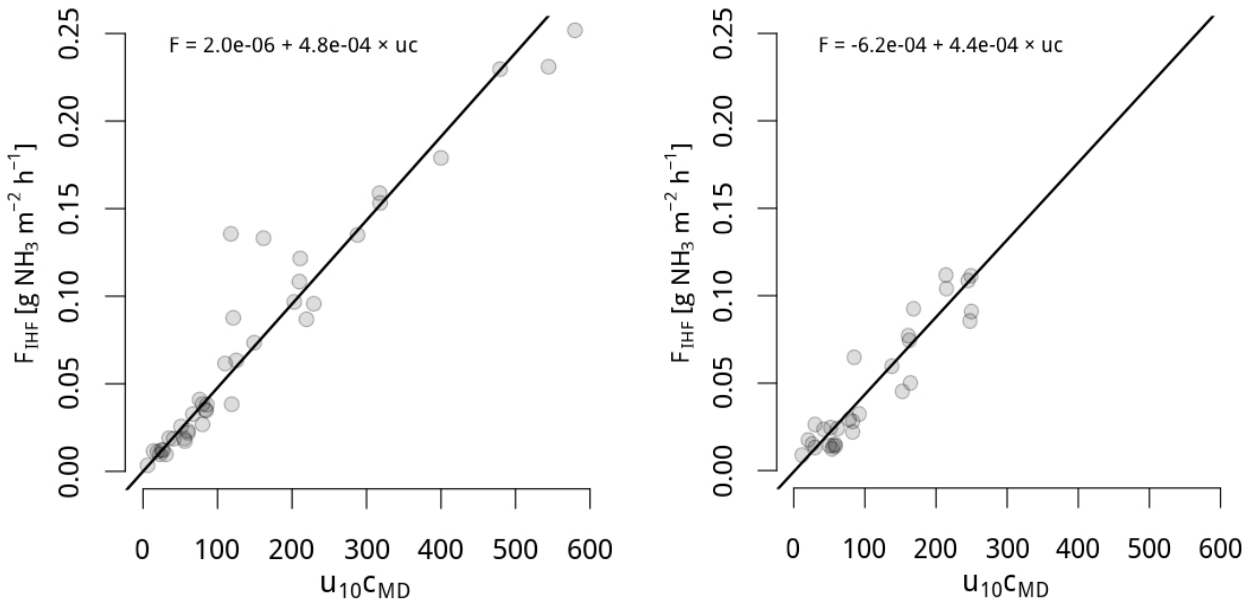


Abbildung 13: Scatterplot mit Trendlinie der robusten, linearen Regression der auf den Passivsammler Wochenmittel basierenden IHF Emissionsflüsse (F_{IHF}) auf das über eine Woche gemittelte Produkt der Windgeschwindigkeit (u_{10}) mit der miniDOAS Konzentration (c_{MD}). Links Behälter ohne Abdeckung, rechts Behälter mit Abdeckung.

Die auf 10 Minuten extrapolierte Emission (E_{DOAS}) wird somit durch Ersetzen der Grösse F_{IHF} durch E_{DOAS} in den Gleichungen (2) und (3) beschrieben.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den Verlauf der Ammoniakemissionen vom ungedeckten sowie dem abgedeckten Lagerbehälter für die Zeitperioden 2016 bis 2017 bzw. 2017 bis 2018 gemäss Massenbilanz und Skalierung. Die Abweichungen zwischen den beiden Ansätzen stimmen über den grössten Teil der Zeitreihen mit Abweichungen von weniger als 20% gut überein. Die grosse Differenz für die beiden Werte Ende Juli und Mitte August 2016 ist nicht eindeutig erklärbar. In dieser Phase der Messung (zwischen Mitte Juli und Ende September) führten Probleme mit der Kühlung des miniDOAS bei hohen Temperaturen zu grösseren Messlücken.

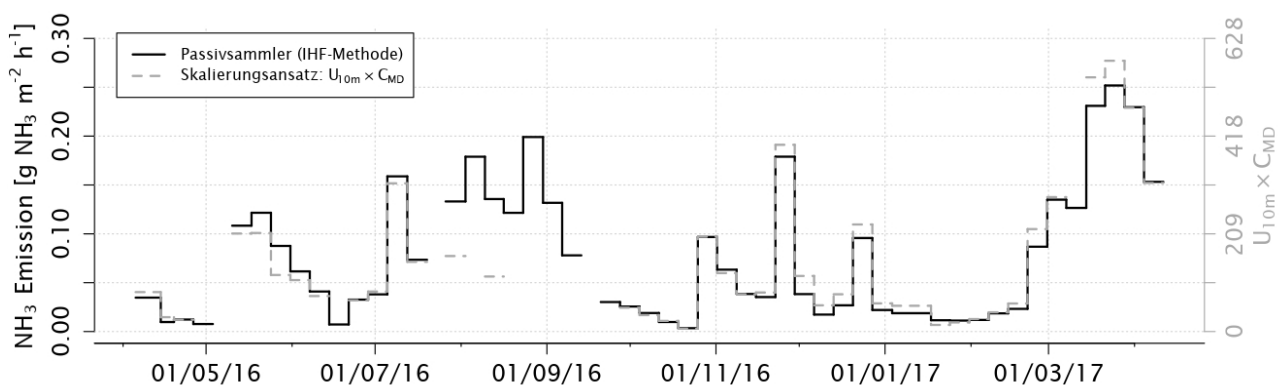


Abbildung 14: Vergleich der Ammoniakemissionen der Messperiode vom nicht abgedeckten Lagerbehälter gemäss der beiden Ansätze Massenbilanz und Skalierung.

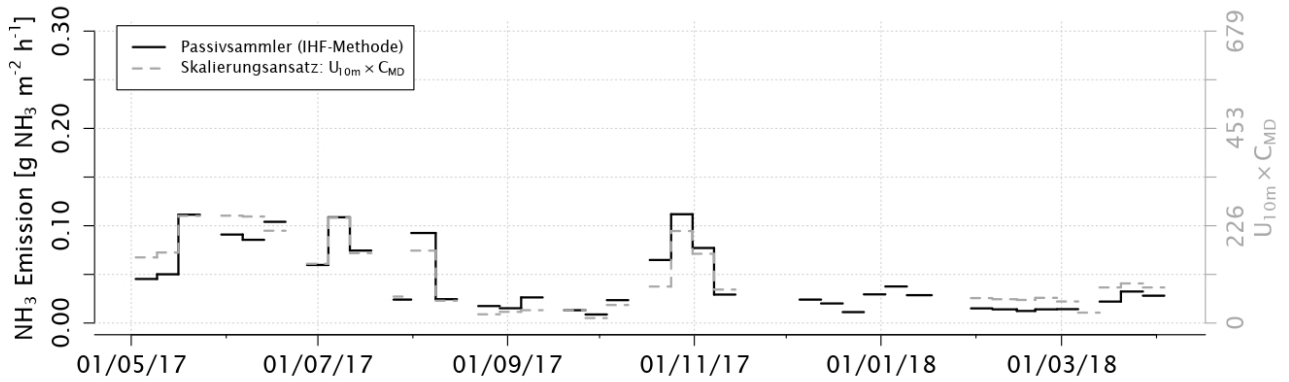


Abbildung 15: Vergleich der Ammoniakemissionen der Messperiode vom abgedeckten Lagerbehälter gemäss der beiden Ansätze Massenbilanz und Skalierung.

3.6 Ammoniakemissionen

3.6.1 Ungedeckter Lagerbehälter

Die über die ganze Messperiode (30.01.15-18.04.17) gemittelte Emission betrug $0.07 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Tabelle 7). Die Mittelwerte für die Jahre 2015 und 2016 lagen bei 0.08 und $0.05 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Die maximalen Emissionen erreichten im Stundenmittel rund $1.5 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Der Verlauf der Emissionshöhe über das Jahr entsprach in etwa dem erwarteten Muster mit den niedrigsten Emissionen im Winter und den höchsten während der warmen Jahreszeit sowie den typischen Tagesgängen mit den jeweils höchsten Emissionen um die Mittagszeit (Abbildung 16). Die Messperiode im Frühling 2015 und 2017 wiesen unerwartet hohe Emissionswerte auf (Abbildung 17). Die Ursachen werden in Anhang 7.7.7 diskutiert.

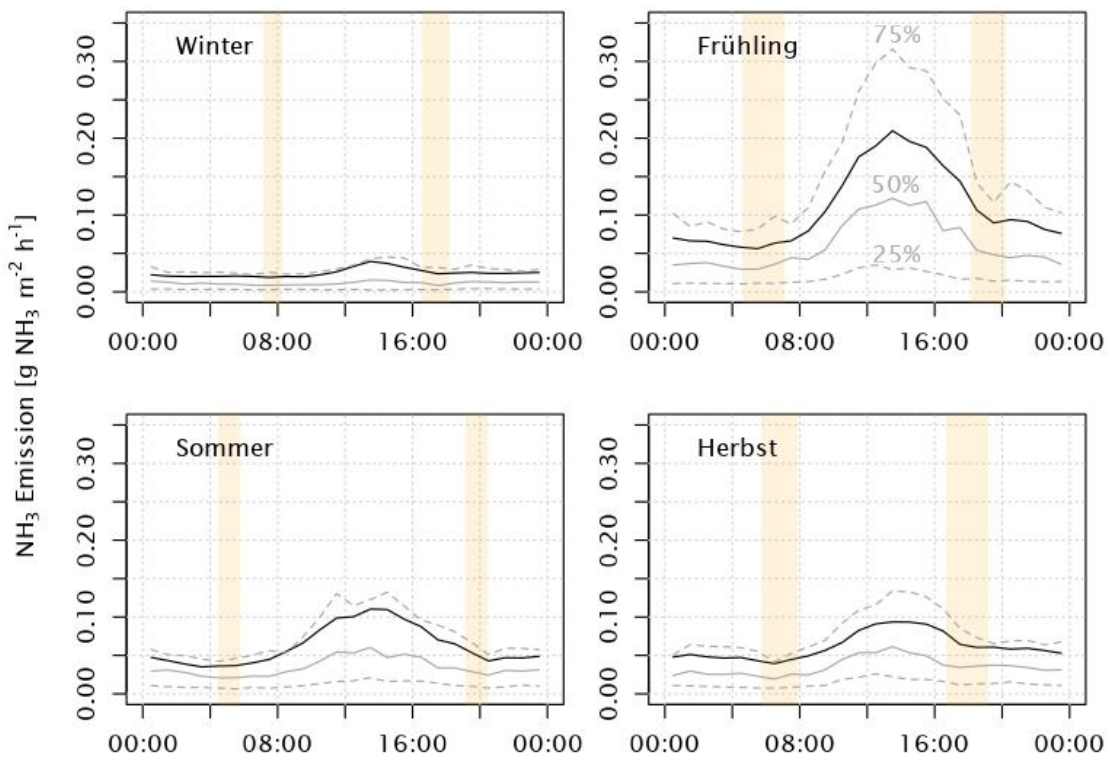


Abbildung 16: Tagesgang der NH_3 Emissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) vom ungedeckten Lagerbehälter gemittelt über die ganze Messperiode. Angegeben sind das 25 % Perzentil, Median, Mittelwert (schwarz) und 75 % Perzentil. Die Uhrzeit zeigt die mitteleuropäische Winterzeit. Die Zeitspanne der Sonnenauf- und Sonnenuntergänge sind orange-transparent eingezeichnet (Agafonkin, Thieurmél, 2018).

Tabelle 7: Gemessene NH₃ Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter (Rindviehgülle). Die Messperioden wurden nach Jahreszeit (J) aufgeteilt in Winter (W), Frühling (F), Sommer (S) und Herbst (H). Die zeitliche Abdeckung (ZA) der jeweiligen Messperiode ist angegeben als Anzahl Stunden sowie % der angegebenen Messperiode. Die Emissionen sind angegeben in g NH₃ m⁻² h⁻¹, als Mittelwert (MW) und Bereich zwischen Minimum und Maximum der auf eine Stunde gemittelten 10-Minuten Messintervalle. Weiter sind angegeben: Mittelwert von Temperatur (T.; Messung auf 4.5 m), Windgeschwindigkeit (W., Messung auf 10 m), Anteil Messintervalle mit Niederschlag (Niederschlag %; Messung auf 1.0 m) und Niederschlagssumme (Niederschlag Σ (mm); Messung auf 4.5 m) sowie Häufigkeit und Dauer (in h) von Rühren und Befüllen des Lagerbehälters sowie der Füllstand (Fst) der Gülle im Lagerbehälter.

Stundenintervalle, welche eine zeitliche Abdeckung der Emission von weniger als 45 Minuten aufwiesen, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Dies hat zur Folge, dass z.B. die Anzahl Tage (=Häufigkeit), an denen gerührt wurde, nicht mit der Angabe in Kap. 3.3 übereinstimmen muss.

Messperiode	J*	ZA**	NH ₃ -Emission		T.***	W.#	Niederschlag##		Rühren	Befüllen	Fst.###
			MW	Bereich	MW		%	Σ (mm)	Anzahl Ereignisse / Dauer in h	m	
		Anzahl h / %	g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹		°C	m s ⁻¹					
30.01.15-28.02.15	W	646h / 90%	< 0.01	< 0.01 - 0.07	0.8	1.6	-	39	0 / 0h	3 / 16h	3.2
01.03.15-31.05.15	F	2114h / 96%	0.13	0.00 - 1.16	11.4	1.5	-	360	10 / 35h	8 / 25h	1.1
01.06.15-31.08.15	S	1535h / 70%	0.05	< 0.01 - 1.45	20.0	1.0	9	148	3 / 6h	4 / 12h	1.2
01.09.15-30.11.15	H	1979h / 91%	0.08	< 0.01 - 0.63	10.6	1.2	9	144	5 / 13h	5 / 27h	0.5
01.12.15-29.02.16	W	1983h / 91%	0.02	< 0.01 - 0.24	7.0	1.3	18	246	1 / 4h	8 / 29h	1.9
01.03.16-31.05.16	F	1863h / 84%	0.05	< 0.01 - 0.73	14.5	1.3	17	284	6 / 32h	8 / 18h	2.5
01.06.16-31.08.16	S	1717h / 78%	0.08	< 0.01 - 0.76	20.6	1.0	13	279	6 / 21h	9 / 10h	1.5
01.09.16-30.11.16	H	1903h / 87%	0.05	< 0.01 - 0.51	10.0	1.3	12	167	4 / 12h	7 / 11h	1.0
01.12.16-28.02.17	W	1984h / 92%	0.03	< 0.01 - 0.62	0.8	1.4	8	87	3 / 22h	9 / 15h	1.2
01.03.17-18.04.17	F	1048h / 89%	0.19	< 0.01 - 1.18	10.4	1.8	10	40	5 / 6h	3 / 5h	1.2
30.01.15-31.12.15	2015	6857h / 85%	0.08	< 0.01 - 1.45	11.5	1.3	9	704	18 / 55h	22 / 89h	1.1
01.01.16-31.12.16	2016	7610h / 87%	0.05	< 0.01 - 0.76	12.3	1.2	15	965	18 / 69h	33 / 63h	1.7
30.01.15-18.04.17	2015-2017	16773h / 86%	0.07	< 0.01 - 1.45	11.0	1.3	12	1795	43 / 151h	64 / 167h	1.4

* J: Jahreszeit: W: Winter, F: Frühling, S: Sommer, H: Herbst

** ZA: Zeitliche Abdeckung; %: prozentueller Anteil an den gesamten Anzahl h der Messperiode

*** T: Temperatur

W: Windgeschwindigkeit

Niederschlag %: Anteil Messintervalle mit Niederschlag; Niederschlag Σ: Niederschlagssumme in mm

F. Füllstand

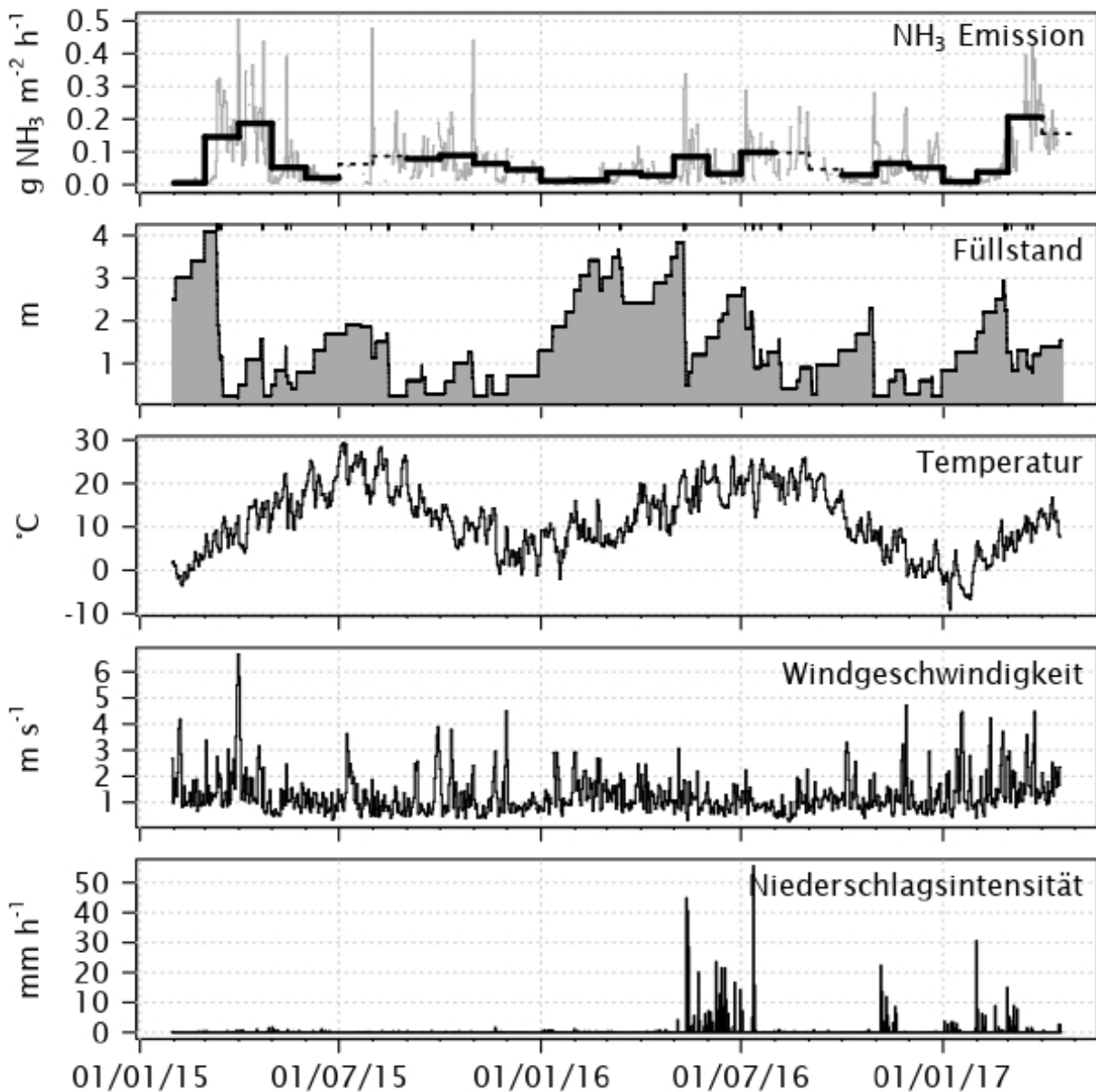


Abbildung 17: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom nicht abgedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 (oben). Eingezeichnet sind die Stundenmittelwerte (grau), sowie die Monatsmittelwerte (schwarz, fett). Monatsmittelwerte basierend auf einer Datengrundlage von weniger als 75% der Mittelungszeit (21 – 23 Tage, je nach Monat) sind gestrichelt eingezeichnet. Unten sind die Einflussgrößen Füllstand der Gülle im Lagerbehälter (m), Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Windgeschwindigkeit in (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität in (mm h^{-1}) aufgeführt.

Der Bereich der gemessenen NH_3 -Emissionen stimmt gut überein mit dem Medianwert für Rindviehgülle aus Studien, die unter Umweltbedingungen oder im Pilotmassstab durchgeführt wurden (Tabelle 8⁶). Schweingegülle weist in der Regel höhere Lageremissionen als Rindviehgülle auf wegen des höheren Anteils an löslichem Stickstoff und der geringere Ausbildung einer Schwimmschicht von Schweingülle. Daten aus publizierten Literaturreviews oder in Modellen verwendete Werte (untere Hälfte von Tabelle 8) weisen grösstenteils deutlich höhere Emissionsraten auf. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass für solche Dokumente nicht zwischen Studien unter Umweltbedingungen, im Pilot- oder Labormassstab unterschieden wird. Vor allem Laborstudien zeigen deutlich erhöhte Emissionen auf (Daten nicht dargestellt). Dies dürfte

⁶ Der Medianwert dürfte für den Vergleich besser geeignet sein, da im Datensatz von Tabelle 8 die Werte einzelner Studien deutlich höher liegen als die Werte des Grossteils der übrigen Studien.

auf die kleinen Güllemengen (1 bis 250 Liter) zurückzuführen sein. So dürfte sich bei solch kleinen Mengen kaum eine natürliche Schwimmschicht bilden⁷.

Tabelle 8: Emissionsraten aus der Literatur von unbehandelter Rindvieh- und Schweinegülle aus ungedeckten Lagerbehältern in g NH₃ m⁻² h⁻¹

Gülle	Lager	Emissionsrate g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹	Quelle
Daten von einzelnen Studien			
Rindvieh	Studien unter Umweltbedingungen, Lagerbehälter ohne Lagunen / Studien in Pilotanlagen (0.5 bis 10 m ³ Lagervolumen)	n=15 / 62 Mittelwert: 0.12 / 0.09 Median: 0.05 / 0.08 Bereich:0.02-0.6 / 0.03-0.44	Daten von einer laufenden Literaturstudie zusammengestellt von T. Kupper (HAFL), C. Kincaid, A. VanderZaag (Agriculture and Agri-Food Canada);
Schweine	Studien unter Umweltbedingungen, Lagerbehälter ohne Lagunen / Studien in Pilotanlagen (0.5 bis 10 m ³ Lagervolumen)	n=22 / 19 Mittelwert: 0.16 / 0.25 Median: 0.07 / 0.20 Bereich:0.08-0.6 / 0.02-0.92	Lagerbehälter mit oder ohne natürliche Schwimmschicht
Daten aus publizierten Literaturreviews oder in Modellen verwendete Werte			
Rindvieh	Mit natürl. Schwimmschicht	0.11	VanderZaag et al. (2015)
Rindvieh	Keine Angabe	0.20	Sommer et al. (2006)
Schweine	Keine Angabe	0.40	VanderZaag et al. (2015)
Schweine	Keine Angabe	0.30	Sommer et al. (2006)
Rindvieh	Ohne natürl. Schwimmschicht	0.30	Kupper, Menzi (2013)*
Schweine	Ohne natürl. Schwimmschicht	0.40	Kupper, Menzi (2013)*
Rindvieh/ Schweine	Keine Angabe	0.13-0.25	UNECE (2014)

*Werte verwendet im Modell Agrammon

Tabelle 9 zeigt die Nährstoffgehalte der Gülle im ungedeckten Lagerbehälter. Die Mittelwerte der drei Analysewerte liegen bezüglich Trockensubstanz, Gesamtstickstoff und Ammonium etwas über den Standardwerten der GRUD (Richner et al., 2017). Mit Ausnahme von Magnesium und organischer Substanz sind auch die übrigen Elemente etwas grösser als die üblichen Werte. Die gelagerte Gülle ist insgesamt etwas nährstoffreicher als die Standardwerte gemäss GRUD, liegt aber innerhalb eines Bereichs, der für Rindviehvollgülle typisch ist (nicht publizierte Resultate gemäss mündl. Mitteilung C. Bosshard, Agroscope).

Basierend auf der Summe der Füllstandsänderungen lässt sich die produzierte, mittlere Güllemenge pro Tag berechnen. Der resultierende Wert von 11.1 m³ pro Tag während der Messdauer stimmt gut überein mit der produzierten Menge von 12.6 m³ pro Tag geschätzt auf der Grundlage von Richner et al. (2017)⁸. Basierend auf dem mittleren Ammonium Gehalt lässt sich daraus eine TAN-Fracht (TAN≈Ammonium) in der Gülle von 15.8 kg NH₄⁺-N pro Tag berechnen. Der berechnete NH₃-Verlust beträgt 0.46 kg NH₃-N pro Tag, was einer Emission von 2.9% des TAN-Flusses ins Lager entspricht (Tabelle 10). Die Verlustraten sind niedriger im Winter und höher in den wärmeren Jahreszeiten mit dem Höchstwert im Frühjahr, was dem in Tabelle 7 gezeigten Muster entspricht. Die beiden Jahre 2015 und 2016 unterscheiden sich deutlich: das erstere weist eine doppelt so hohe Emission in % TAN auf.

⁷ Diese Befunde werden im Rahmen eines Projekts von EAGER noch Gegenstand vertiefter Abklärungen sein (www.eager.ch)

⁸ Menge produzierte Vollgülle pro Kuh und Jahr: 23 m³ pro Jahr, angenommene Verdünnung: 1:1, 100 Milchkühe; nicht eingerechnet ist eine Korrektur für die Weide: 23 m³ / 365 * 2* 100 = 12.6 m³ pro Jahr

Die berechneten Emissionen liegen deutlich tiefer als die Zahlen gemäss Reidy et al. (2008), welche 16% bis 28% TAN betragen oder EEA (2016), die 20% TAN angibt. Die Ursachen dieser im Vergleich zur vorliegenden Studie hohen Werte würden sich nur mit einem grossen Aufwand mittels Nachfrage bei den Autoren verifizieren lassen, da in den angegebenen Studien die Quellen nicht oder nur ungenügend ausgewiesen sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie vorwiegend auf Labor- oder Pilotstudien basieren, in welchen sich wegen einer niedrigen Füllhöhe keine oder nur eine geringe Schwimmschicht ausbilden kann (z.B. Misselbrook et al., 2005). Unter solchen Bedingungen sind die Emissionen deutlich erhöht. Ergänzend dazu ist zu erwähnen, dass Baldé et al. (2018), die eine sehr gute Studie unter Umweltbedingungen mit einer ähnlichen Gülle (TS: 3.9%, NH₄⁺: 1.1 g L⁻¹; Schwimmschicht: 30 cm Höhe) durchgeführt haben, Emissionen von 16% TAN angeben. Die Diskrepanz zur vorliegenden Studie lässt sich grösstenteils dadurch erklären, dass relativ zu einer Einheit TAN-Fluss durch das Lager die emittierende Oberfläche bei Baldé et al. (2018) deutlich grösser ist.

Tabelle 9: Nährstoffgehalte der Gülle von 3 Proben (Entnahme am 14.08.2015 und am 23.03.2017 sowie Vergleich mit den Normwerten für Vollgülle Rindvieh gemäss Richner et al. (2017); vgl. auch Tabelle 22, Anhang 7.5

		Güllelager Tagelswangen				Mittelw.	Vollgülle Rindvieh* Richner et al. (2017)
		14.08.2015 (1)	14.08.2015 (2)	23.03.2017			
Trockensubstanz	%	3.8	5.8	6.9	5.5	4.5	
Organ. Substanz	%	67	72	77	72	77	
Gesamtstickstoff	g L ⁻¹	2.41	2.58	3.06	2.69	1.95	
Ammonium	g L ⁻¹	1.49	1.28	1.50	1.42	1.05	
Phosphor (P)	g L ⁻¹	-	-	0.50	0.50	0.37	
Kalium (K)	g L ⁻¹	-	-	3.76	3.76	3.1	
Calcium	g L ⁻¹	-	-	1.57	1.57	0.75	
Magnesium	g L ⁻¹	-	-	0.33	0.33	0.31	
Schwefel	g L ⁻¹	-	-	0.30	0.30	-	

*1:1 Gülle-Wasser Verdünnung

Tabelle 10: Ammoniakemissionen in kg NH₃-N pro Tag und in Prozent TAN in der Gülle vom nicht abgedeckten Lagerbehälter aufgeschlüsselt nach den Jahreszeiten (Durchschnitt aus 2 oder 3 Jahren), für die Jahre 2015 und 2016 sowie für die ganze Messperiode zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017. Angegeben sind weiter die Anzahl Tage, welche für die Berechnung der NH₃-Emission verwendet wurde, sowie die Zeit in % für welche eine natürliche Schwimmschicht vorhanden war (d.h. >14 Tage nach Rührevent gemäss Kapitel 3.4). Die Zahlen in Klammer geben die Werte für die gesamte Messdauer wieder, d.h. nicht nur für die Intervalle, welche in die Berechnung einflussen. Weiter sind die Tagesmittelwerte der produzierten Güllemenge berechnet aufgrund der Füllstandänderungen sowie die Tagesmittelwerte der TAN-Menge in der Gülle angegeben.

	Anzahl Tage	Zeit mit nat. Ss***	Produzierte Güllemenge****	Produzierte Menge TAN	NH ₃ -Emissionen	
					kg NH ₃ -N Tag ⁻¹	% TAN
	-	%	m ³ Tag ⁻¹	kg NH ₄ -N Tag ⁻¹	kg NH ₃ -N Tag ⁻¹	% TAN
Winter*	167 (181)	80 (81)	12.7	18.0	0.19	1.1
Frühjahr*	212 (232)	44 (45)	14.4	20.5	0.75	3.7
Sommer**	138 (184)	56 (51)	11.6	16.6	0.44	2.6
Herbst**	164 (182)	58 (56)	10.8	15.4	0.43	2.8
2015	290 (336)	57 (55)	9.8	14.0	0.52	3.8
2016	322 (366)	62 (60)	12.4	17.6	0.33	1.9
2015-2017	709 (809)	60 (58)	11.1	15.8	0.46	2.9

* Werte wurden aus 3 verschiedenen Jahren zusammengefasst (2015/2016/2017).

** Werte wurden aus 2 verschiedenen Jahren zusammengefasst (2015/2016).

*** nat. Ss.: natürliche Schwimmschicht

**** Wert gemäss Richner et al. (2017): 12.6 m³ Tag⁻¹

3.6.2 Abgedeckter Lagerbehälter

Die über die ganze Messperiode (02.05.17-28.05.18) gemittelte Emission betrug $0.05 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Tabelle 11). Die maximalen Emissionen erreichten im Stundenmittel rund $0.5 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Wie beim nicht abgedeckten Lagerbehälter entsprach der Verlauf der Emissionshöhe über das Jahr in etwa dem erwarteten Muster mit den niedrigsten Emissionen im Winter und den höchsten während der warmen Jahreszeit (Abbildung 19). Das Emissionsniveau liegt tiefer im Vergleich zur Messdauer ohne Abdeckung mit Ausnahme der Sommerperiode 2015 (Tabelle 7).

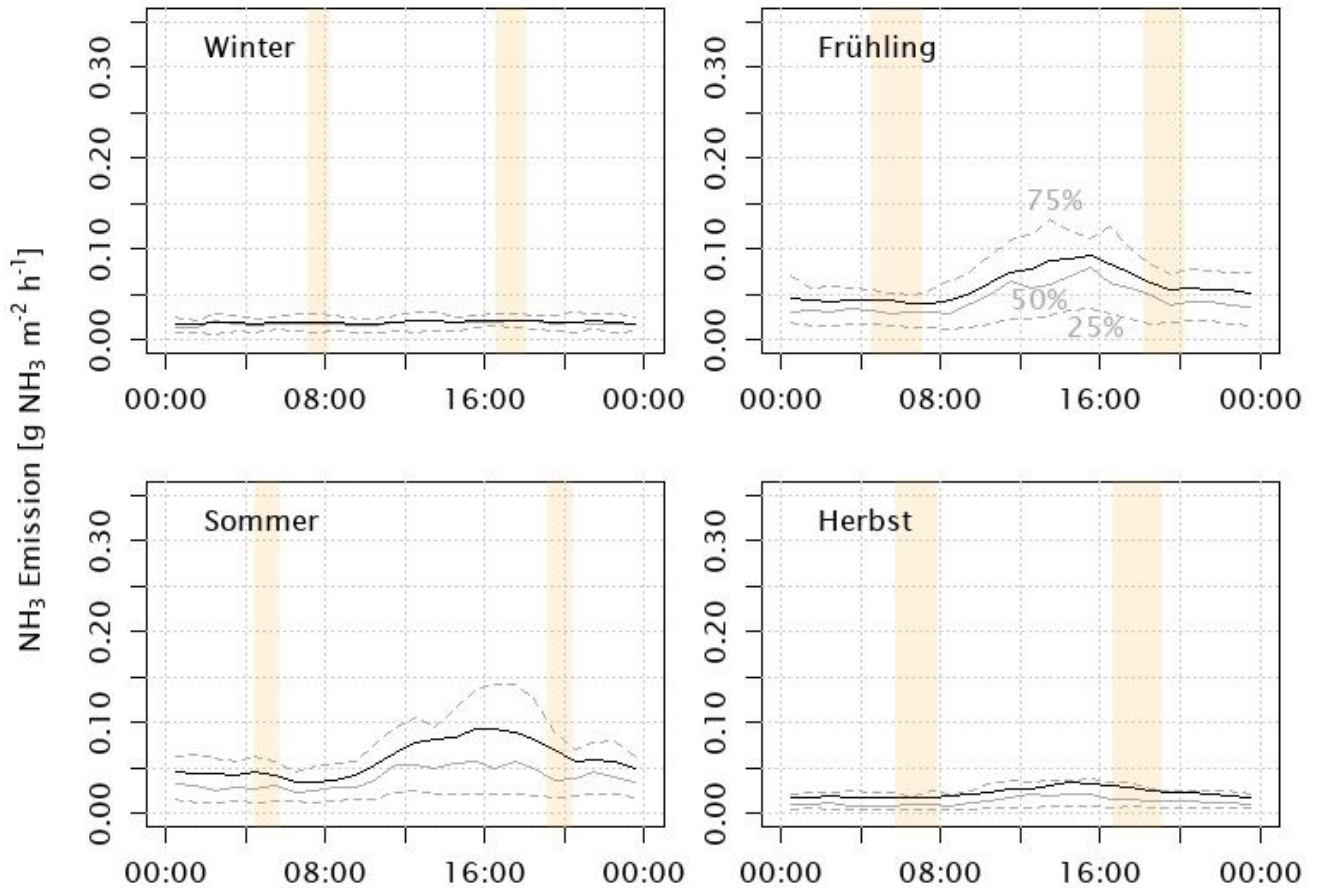


Abbildung 18: Tagesgang der NH_3 Emissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) vom gedeckten Lagerbehälter gemittelt über die ganze Messperiode. Angegeben sind das 25 % Perzentil, Median, Mittelwert (schwarz) und 75 % Perzentil. Die Uhrzeit zeigt die mitteleuropäische Winterzeit. Die Zeitspanne der Sonnenauf- und Sonnenuntergänge sind orange-transparent eingezeichnet (Agafonkin, Thieurmel, 2018).

Tabelle 11: Gemessene NH₃ Emissionen vom abgedeckten Lagerbehälter (Rindviehgülle). Die Messperioden wurden nach Jahreszeit (J) aufgeteilt in Winter (W), Frühling (F), Sommer (S) und Herbst (H). Die zeitliche Abdeckung (ZA) der jeweiligen Messperiode ist angegeben als Anzahl Stunden sowie % der angegebenen Messperiode. Die Emissionen sind angegeben in g NH₃ m⁻² h⁻¹, als Mittelwert (MW) und Bereich zwischen Minimum und Maximum der auf eine Stunde gemittelten 10-Minuten Messintervalle. Weiter sind angegeben: Mittelwert von Temperatur (T.; Messung auf 4.5 m), Windgeschwindigkeit (W., Messung auf 10 m), Anteil Messintervalle mit Niederschlag (Niederschlag %; Messung auf 1.0 m) und Niederschlagssumme (Niederschlag Σ (mm); Messung auf 4.5 m) sowie Häufigkeit und Dauer (in h) von Rühren und Befüllen des Lagerbehälters sowie der Füllstand (Fst) der Gülle im Lagerbehälter.

Stundenintervalle, welche eine zeitliche Abdeckung der Emission von weniger als 45 Minuten aufwiesen, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Dies hat zur Folge, dass z.B. die Anzahl Tage (=Häufigkeit), an denen gerührt wurde, nicht mit der Angabe in Kap. 3.3 übereinstimmen muss.

Messperiode	J*	ZA**	NH ₃ -Emission		T.***	W.#	Niederschlag##		Rühren	Befüllen	Fst.###
			MW	Bereich			MW	%			
		Anzahl h / %	g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹		°C	m s ⁻¹			Anzahl Ereignisse / Dauer in h		m
02.05.17-31.05.17	F	708h / 98%	0.09	0.01 - 0.38	16.4	1.4	9	56	3 / 9h	4 / 5h	0.9
01.06.17-31.08.17	S	2056h / 93%	0.06	< 0.01 - 0.46	20.6	1.1	9	250	5 / 17h	9 / 10h	0.8
01.09.17-30.11.17	H	1816h / 83%	0.02	< 0.01 - 0.23	11.7	0.7	11	191	5 / 16h	8 / 11h	0.8
01.12.17-28.02.18	W	1040h / 48%	0.02	< 0.01 - 0.08	-0.8	1.9	12	88	1 / 4h	6 / 7h	2.5
01.03.18-31.05.18	F	2135h / 97%	0.05	< 0.01 - 0.31	8.2	1.4	8	135	9 / 65h	8 / 13h	1.6
02.05.17-31.12.17	2017	4611h / 79%	0.05	< 0.01 - 0.46	16.4	1.0	10	505	13 / 43h	21 / 25h	0.8
01.01.18-28.05.18	2018	3143h / 88%	0.04	< 0.01 - 0.31	5.3	1.6	9	215	10 / 69h	14 / 20h	1.9
02.05.17-28.05.18	2017-2018	7754h / 82%	0.05	< 0.01 - 0.46	11.9	1.2	10	720	23 / 112h	35 / 45h	1.2

* J: Jahreszeit: W: Winter, F: Frühling, S: Sommer, H: Herbst

** ZA: Zeitliche Abdeckung; %: prozentueller Anteil an den gesamten Anzahl h der Messperiode

*** T: Temperatur

W: Windgeschwindigkeit

Niederschlag %: Anteil Messintervalle mit Niederschlag; Niederschlag Σ: Niederschlagssumme in mm

F. Füllstand

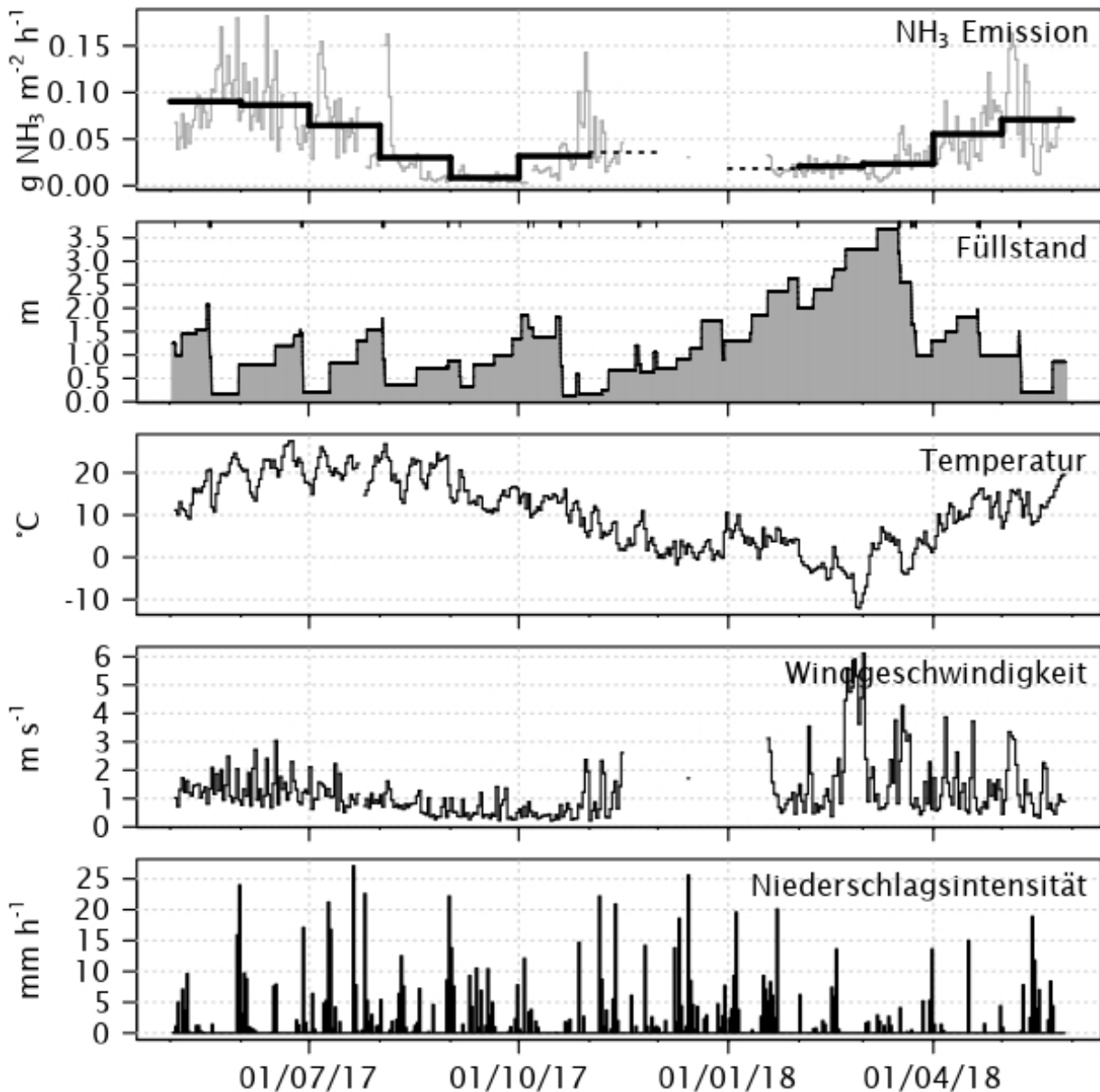


Abbildung 19: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom abgedeckten Lagerbehälter zwischen 02.05.2017 und 28.05.2018 (oben). Eingezeichnet sind die Stundenmittelwerte (grau), sowie die Monatsmittelwerte (schwarz, fett). Monatsmittelwerte basierend auf einer Datengrundlage von weniger als 75% der Mittelungszeit (21 – 23 Tage, je nach Monat) sind gestrichelt eingezeichnet. Unten sind die Einflussgrößen Füllstand der Gülle im Lagerbehälter (m), Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Windgeschwindigkeit in (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität in (mm h^{-1}) aufgeführt.

3.6.3 Wirksamkeit der Abdeckung für die Reduktion der Ammoniakemissionen

3.6.3.1 Direkter Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und abgedeckten Lagerbehälter basierend auf den hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen identischen Kategorien

Für den direkten Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und abgedeckten Lager wurden die gemessenen Emissionen gemäss Kap. 2.4.2 gemittelt und aufgelöst nach den folgenden Kategorien dargestellt: Zeit nach Rührereignis (0 – 24h, 1 – 14d, > 14d), Füllstand des Lagerbehälters ($\leq 1 \text{ m}$, $> 1 \text{ m}$), Niederschlagsintensität (0 mm h^{-1} , $< 2 \text{ mm h}^{-1}$, $2 - 10 \text{ mm h}^{-1}$), Temperatur ($\leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $> 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und Windgeschwindigkeit ($\leq 1 \text{ m s}^{-1}$, $> 1 \text{ m s}^{-1}$, vgl. Tabelle 2). Die Resultate sind in Abbildung 20 und in je einer Tabelle für die Zeit nach dem letzten Rührereignis (0 – 24h, 1 – 14d, > 14d; Tabelle 23 bis Tabelle 25, Anhang 7.6) für die je 24

Kategorien dargestellt, wo auch ein Vergleich zwischen den Emissionen vom ungedeckten und vom gedeckten Lager erfolgt.

Insgesamt gibt es für den Vergleich 72 Kategorien. Davon liegen für 43 Kategorien Messwerte vor, welche einen Vergleich zwischen den Emissionen vom ungedeckten und vom abgedeckten Lagerbehälter erlauben (Tabelle 12, Abbildung 20). Dies entspricht einem Anteil von 60% aller Kategorien. Für 34 der 43 bzw. 79% der Kategorien waren die Emissionen mit Abdeckung tiefer als ohne Abdeckung. Davon liegen für 18 Kategorien statistisch signifikante Unterschiede vor, was einem Anteil von 53% entspricht (Zeilen 2 bis 4 von Tabelle 12). Umgekehrt waren für 9 der 43 bzw. 21% der Kategorien die Emissionen mit Abdeckung höher als ohne Abdeckung. Statistisch signifikante Unterschiede treten hier in keinem Fall auf (Zeilen 5 bis 6 von Tabelle 12).

In den Fällen, in welchen ohne Abdeckung niedrigere Emissionen auftraten als mit Abdeckung, sind die mittleren Konzentrationen um mehr als 50% tiefer im Vergleich zu denjenigen Fällen, in welchen die Emissionen vom abgedeckten Behälter tiefer waren (Zeilen 8 und 9 von Tabelle 12). Diese Übersicht zeigt, dass sich eine emissionsmindernde Wirkung der Abdeckung eindeutig nachweisen lässt. Dies gilt trotz Vorliegen von Situationen, in welchen die Emissionen mit Abdeckung grösser sind als ohne Abdeckung. Denn in diesen Fällen von negativer Emissionsreduktion ist die absolute Emissionshöhe niedrig, weshalb sie für die Emissionsreduktion insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen. Eine differenziertere Diskussion zum Vorkommen von negativer Emissionsreduktion folgt weiter unten.

Tabelle 12: Zusammenfassender Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und vom gedeckten Lager für die Kategorien mit einem zeitlichen Abstand 0 – 24h, 1 – 14d, > 14d nach dem letzten Rührereignis (detaillierte Daten in Tabelle 23 bis Tabelle 26, Anhang 7.6)

		0-24h	1-14d	>14d	Total
1.	Anzahl Kategorien mit vorhanden Messdaten*	14	17	12	43
2.	Prozentualer Anteil Kategorien mit vorhanden Messdaten*	58%	71%	50%	60%
3.	Anzahl / Anteil der Kategorien mit Emissionen ohne Abdeckung > Emissionen mit Abdeckung	12 / 86%	12 / 71%	10 / 83%	34 / 79%
4.	Anteil der Kategorien mit Emissionen ohne Abdeckung > Emissionen mit Abdeckung und statistisch signifikanten Unterschieden	58%	58%	40%	53%
5.	Anzahl / Anteil der Kategorien mit Emissionen ohne Abdeckung < Emissionen mit Abdeckung	2 / 14%	5 / 29%	2 / 17%	9 / 21%
6.	Anteil der Kategorien mit Emissionen ohne Abdeckung < Emissionen mit Abdeckung und statistisch signifikanten Unterschieden	0%	0%	0%	0%
7.	Anteil 10-Minuten Intervalle vom Total verfügbarer 10-Minuten Intervalle (n=62'136), für die ein Vergleich zw. ungedecktem und gedecktem Lager möglich ist	12%	55%	33%	100%
8.	Mittelwert der Emission in g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹ von Messintervallen, bei denen Emissionen ohne Abdeckung > Emissionen mit Abdeckung	0.15	0.11	0.06	0.11
9.	Mittelwert der Emission in g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹ von Messintervallen, bei denen Emissionen ohne Abdeckung < Emissionen mit Abdeckung	0.04	0.04	0.06	0.04

*Anzahl mögliche Kategorien für den Vergleich zwischen den Emissionen vom ungedeckten und abgedeckten Lagerbehälter: je 24 klassiert für die Zeit nach dem letzten Rührereignis 0 – 24h, 1 – 14d, >14d; total: 72

Betrachtet man die Kategorien unterteilt nach Zeit nach dem letzten Rührereignis 0 – 24h, 1 – 14d und >14d separat, so zeigt sich, dass bei Trockenwetter die Emissionsminderung abnimmt von 0 – 24h in Richtung >14d nach dem letzten Rührereignis (Abbildung 20, Tabelle 26, Anhang 7.6). Die maximale Emissionsminderung beträgt 81%, 73% und 56% für 0 – 24h, 1 – 14d bzw. >14d nach dem letzten Rührereignis. Die Emissionshöhe zeigt ein

vergleichbares Muster: Emissionen bei 0 – 24h > 1 – 14d > >14d nach dem letzten Rührereignis. Die Abdeckung bewirkt demnach in denjenigen Situationen eine hohe Emissionsminderung von bis zu 81%, in denen die Emissionen hoch sind und umgekehrt. Dass die Abdeckung in den Kategorien mit >14d nach dem letzten Rührereignis die Emissionen weniger reduziert, sowohl bei Trockenwetter als auch mit Niederschlag, dürfte auf die natürliche Schwimmschicht zurückzuführen sein (vgl. Anhang 7.7.2).

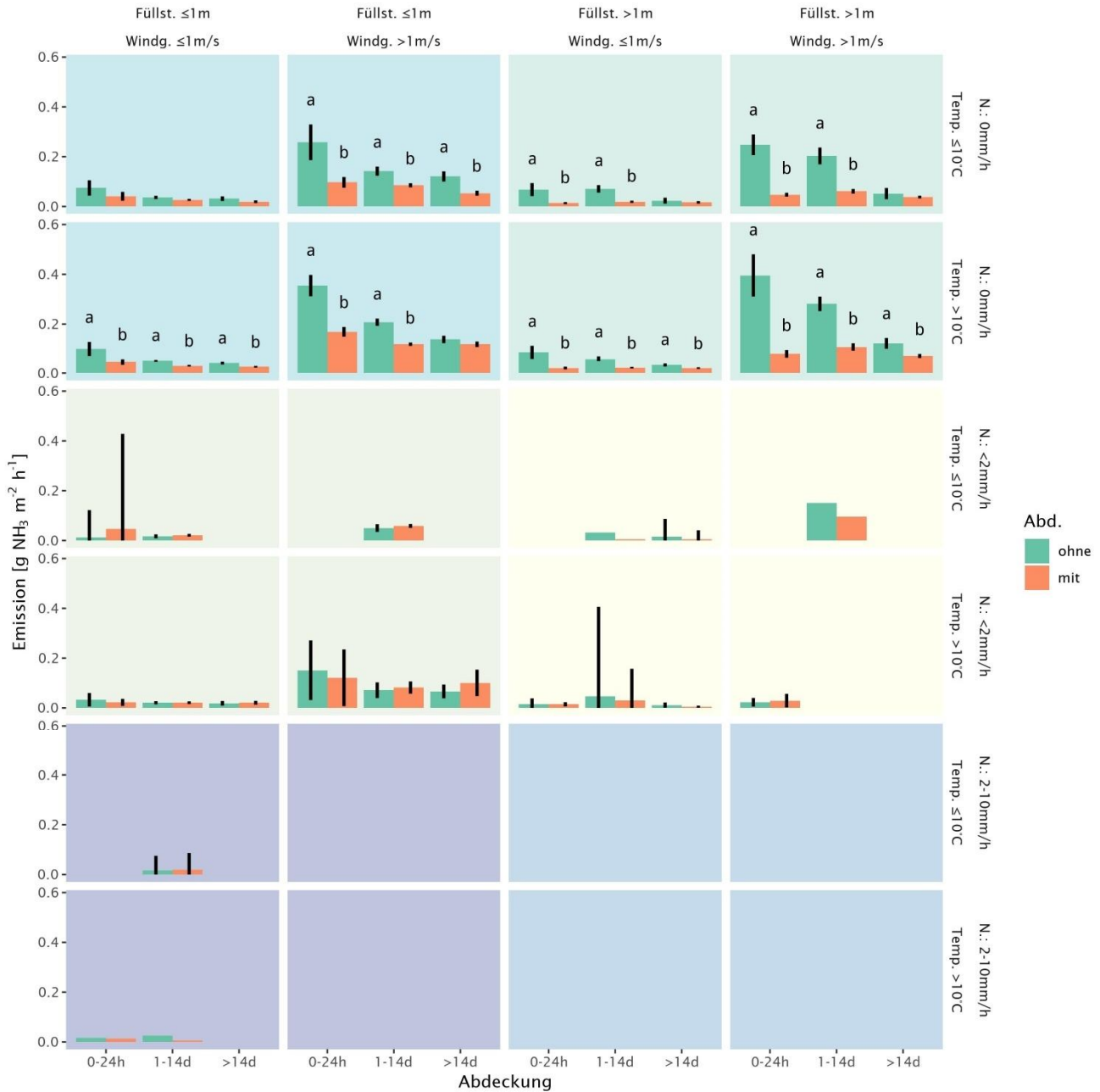


Abbildung 20: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom Lagerbehälter mit und ohne Abdeckung angegeben als Mittelwert für den Zeitraum 0-24h, 1-14d und >14d nach dem letzten Rührereignis (0-24h: keine Schwimmschicht vorhanden; 1-14d: Schwimmschicht schwach ausgebildet/teilweise vorhanden; >14d gut ausgebildete Schwimmschicht vorhanden). Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung entsprechend der verschiedenen Einflussgrößen bzw. der Kategorien gemäss Tabelle 2 für die 24 resultierenden Kategorien. Die horizontale Unterteilung beinhaltet den Füllstand des Lagerbehälters, Füllst. ($\leq 1 \text{ m}$; $> 1 \text{ m}$) sowie die Windgeschwindigkeit, Windg. ($\leq 1 \text{ m s}^{-1}$; $> 1 \text{ m s}^{-1}$) und die vertikale Unterteilung die Niederschlagsintensität, N (0 mm h^{-1} , $< 2 \text{ mm h}^{-1}$; $2-10 \text{ mm h}^{-1}$) sowie die Temperatur, Temp. ($\leq 10^\circ\text{C}$, $> 10^\circ\text{C}$). Unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Säulen geben statistisch signifikante Differenzen an.

Die Emissionsminderung ist bei den Kategorien mit Niederschlag generell tiefer als bei Trockenwetter. Bei mässiger Niederschlagsintensität ($<2 \text{ mm h}^{-1}$) liegt die maximale Emissionsminderung bei 83%. Bei 16 Vergleichen liegt in 8 Fällen eine negative Emissionsminderung vor (bis -278%). Bei hoher Niederschlagsintensität ($2 - 10 \text{ mm h}^{-1}$) liegt bei 3 Vergleichen in einem Fall die Emissionen vom gedeckten Lager höher als beim ungedeckten Lager. Allerdings ist bei diesen Kategorien die Datengrundlage schmal: alle 3 Vergleiche zwischen dem gedeckten und dem ungedeckten Lager basieren auf weniger als 4 Messintervallen. Weiter fällt auf, dass von den total 9 Fällen mit negativer Emissionsminderung 8 Fälle bei einem Füllstand von $\leq 1 \text{ m}$ auftreten.

Die beobachtete negative Emissionsminderung bei Niederschlag lässt sich wie folgt erklären: Niederschlag verdünnt die TAN-Konzentration an der Gülleoberfläche des ungedeckten Lagers. Dadurch verbleibt mehr gasförmiges NH_3 in Lösung und vermindert den Transfer von Ammoniak in die Gasphase. Bei der untersuchten teilschwimmenden Abdeckung bleibt bei Niederschlag zumindest ein Teil der Oberfläche trocken. Da Luftaustausch mit der Umgebung aufgrund der Öffnungen bei einem tiefen Füllstand stattfindet, ist es erklärbar, dass bei Niederschlag die NH_3 -Emissionen hier höher sind als ohne Abdeckung. Dieser Effekt dürfte beim vorliegenden Datensatz auf die Zeitperioden nach einem Rührereignis $1 - 14\text{d}$ und $>14\text{d}$ beschränkt sein. Bei einem zeitlichen Abstand von weniger als 24 h zum letzten Rührereignis hat vermutlich der unterschiedliche zeitliche Abstand innerhalb der 24 h einen grösseren Einfluss auf die Emissionen als Niederschlag. So liegen ja unmittelbar nach Durchmischung der Gülle sehr hohe Emissionsspitzen vor, die innerhalb der Kategorie $0 - 24\text{h}$ neben Ereignissen von bis zu 24 h nach einem Rührereignis vorkommen. Der Effekt der hier beobachteten negativen Emissionsminderung stimmt mit den Resultaten von Petersen et al. (2013) überein.

Da die Zeitdauer mit Niederschlag allgemein tiefer ist als mit Trockenwetter ($<20\%$ der 10-Minuten Intervalle) und zudem bei Regen eine niedrige Emissionshöhe vorliegt und umgekehrt die Emissionsminderung hoch liegt bei Trockenwetter bei gleichzeitig hohen Emissionen, hat die beobachtete negative Emissionsreduktion durch die Abdeckung insgesamt einen geringen Einfluss auf die emissionsmindernde Wirkung der Abdeckung.

Im Übrigen zeigt Abbildung 20, dass die Emission vom Füllstand des Lagerbehälters bzw. der Ausbildung einer Schwimmschicht und von den meteorologischen Bedingungen praktisch immer wie erwartet beeinflusst werden:

- Die Emissionen sind bei Füllstand $\leq 1 \text{ m}$ mehrheitlich grösser als bei Füllstand $>1 \text{ m}$. Dies gilt aber nur für Trockenwetter. Die Differenzen in absoluten Zahlen sind teilweise klein.
- Die Emissionen sind bei Windgeschwindigkeit $\leq 1 \text{ m s}^{-1}$ kleiner als bei Windgeschwindigkeit $> 1 \text{ m s}^{-1}$.
- Die Emissionen sind bei Temperatur $\leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ kleiner als bei Temperatur $> 10 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Die Emissionen sind bei Trockenwetter fast immer grösser im Vergleich zu den entsprechenden Kategorien mit Niederschlag. Bei Niederschlag $<2 \text{ mm h}^{-1}$ sind die Emissionen meist höher als bei Niederschlag $2-10 \text{ mm h}^{-1}$.

Mittels Vergleichs der gesamten Messperiode basierend auf den oben aufgeführten Kategorien, lässt eine emissionsmindernde Wirkung der Abdeckung eindeutig belegen. Sie liegt auf die ganze Messdauer bezogen bei 46%. Die einzelnen Jahre mit mindestens 6 Monaten Messdauer weichen davon nur wenig ab: 2015: 42%; 2016: 47%; 2017: 47%. Die Spannweite der erreichten Emissionsminderung ist breit (Tabelle 26, Anhang 7.6). Bei Trockenwetter liegt der Bereich der beobachteten Emissionsminderung zwischen 14% und 81% und bei Regen zwischen -278% und 83%.

3.6.3.2 Evaluation der Emissionsreduktion aufgrund der Abdeckung mittels Regressionsanalyse

Wie beim direkten Vergleich (Kap. 3.6.3.1) müssen die fünf wichtigsten Einflussfaktoren auf die Emissionen berücksichtigt werden, um die Wirksamkeit der Abdeckung hinsichtlich der Reduktion der NH_3 Emissionen zu analysieren: Zustand der Schwimmschicht, welche vor allem vom zeitlichen Abstand zum vorhergehenden Rühren der Gülle und der Füllhöhe des Behälters abhängt, sowie Niederschlag, Temperatur und Windgeschwindigkeit. Tabelle 13 zeigt eine Übersicht zu den berechneten Effektgrößen mit und ohne Abdeckung.

Die Daten von Tabelle 13 können wie folgt interpretiert werden hinsichtlich:

Zeit nach einem Rührereignis

- Der Basiszustand (aufgeführt unter Spalte Kovariate, Zelle „Basis“) mit Zeit nach einem Rührereignis 0-24h weist eine deutlich niedrigere Emission mit Abdeckung auf als ohne (Koeff_mit: -1.23, entspricht einer Emission von $0.059 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; Koeff_ohne: -0.97, entspricht einer Emission von $0.108 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Dies zeigt, dass die Abdeckung innerhalb von 24h nach einem Rührereignis eine deutliche Emissionsreduktion bewirkt.
- Der Basiszustand mit Zeit nach einem Rührereignis 1-14d zeigt eine deutliche Reduktion im Vergleich zum Basiszustand 0-24h für den ungedeckten und den gedeckten Lagerbehälter: RelEff_ohne: -64%; RelEff_mit: -47%. Dieser Effekt tritt nochmals verstärkt beim Basiszustand mit Zeit nach einem Rührereignis >14d auf (RelEff_ohne: -76%; RelEff_mit: -72%). Diese Effekte sind weitestgehend auf die Ausbildung einer natürlichen Schwimmschicht zurückzuführen, die sich mit zunehmendem Abstand zu einem Rührereignis verstärkt.

Füllstand:

- Ein hoher Füllstand (>1m) führt grundsätzlich zu einer Reduktion der Emission, da die Schwimmschichtbildung bei einem höheren Füllstand besser gefördert wird. Das Gesamtbild ist aber uneinheitlich:
 - Ohne Abdeckung besteht ein kleiner Effekt bei Zeit nach einem Rührereignis 0-24h und 1-14d (RelEff_ohne: -25% bzw. -13%). Bei >14d nach einem Rührereignis zeigt sich ein deutlicher Effekt (RelEff_ohne: -73%).
 - Mit Abdeckung ist die Emissionsminderung gross bei 0-24h Zeit nach einem Rührereignis (RelEff_mit: -53%) und klein bei 1-14d und >14d Zeit nach einem Rührereignis (RelEff_mit: -18% bzw. -26%).

Niederschlag: Niederschlag bewirkt eine deutlich stärkere Reduktion der Emission ohne Abdeckung (RelEff_ohne: von -59% bis -89%) als mit Abdeckung (RelEff_mit: von -14% bis -43%). Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die emittierende Fläche befeuchtet wird. Aus dem Güllelager freigesetztes Ammoniak sorbiert an die benetzte Oberfläche. Unter der Abdeckung bleibt die Oberfläche des Lagers, vor allem bei Vorhandensein, einer Schwimmschicht unbeeinflusst vom Niederschlag und damit auch die Sorption von Ammoniak.

Windgeschwindigkeit: es bestehen praktisch keine Unterschiede in der Abhängigkeit zwischen Emission und Windgeschwindigkeit beim Lager ohne (RelEff_ohne: +9 bis +10% pro 10% Änderung der Windgeschwindigkeit) im Vergleich zum Lager mit Abdeckung (RelEff_mit: +8 bis +9% pro 10% Änderung der Windgeschwindigkeit). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass aufgrund der Öffnung in der Mitte und am Rand ein Luftaustausch in abgeschwächter Form stattfindet.

Tabelle 13: Übersicht zu den berechneten Effektgrössen (Koeffizienten: Koeff.) inklusive der relativen Effektgrössen (rel. Eff.) anhand der Regressionsanalyse. „ohne“ bezieht sich jeweils auf das ungedeckte und „mit“ auf das gedeckte Lager. Die Koeffizienten sind aufgeteilt nach der Zeit nach einem Rührereignis (Z.n.R.) sowie dem Zustand der übrigen Einflussgrössen (Kovariate). Die Kovariate 'Basis' ist durch den folgenden Zustand definiert: Fst ≤ 1 m, N = 0 mm/h, T_{4.5m} = 0 °C und U_{10m} = 1 m/s. Fst: Füllstand; N: Niederschlagsintensität; T_{4.5m}: Lufttemperatur auf 4.5 m (Silorand); U_{10m}: Windgeschwindigkeit auf 10 m. SE: Standardfehler der Effektgrösse

Z.n.R.	Kovariate	Koeff_ohne	SE (Koeff_ohne)	RelEff_ohne	Koeff_mit	SE (Koeff_mit)	RelEff_mit
0-24h	Basis*	-0.97	0.03	-	-1.23	0.03	-
1-14d	Basis*	-0.45	0.04	-0.64	-0.28	0.03	-0.47
>14d	Basis*	-0.61	0.03	-0.76	-0.56	0.03	-0.72
0-24h	Fst>1m	-0.13	0.03	-0.25	-0.33	0.03	-0.53
1-14d	Fst>1m	-0.06	0.04	-0.13	-0.09	0.04	-0.18
>14d	Fst>1m	-0.57	0.04	-0.73	-0.13	0.04	-0.26
0-24h	N<2 mm h ⁻¹	-0.57	0.05	-0.73	-0.24	0.04	-0.43
1-14d	N<2 mm h ⁻¹	-0.52	0.07	-0.70	-0.12	0.06	-0.24
>14d	N<2 mm h ⁻¹	-0.41	0.07	-0.61	-0.09	0.06	-0.18
0-24h	N=2-10 mm h ⁻¹	-0.91	0.10	-0.88	-0.21	0.09	-0.38
1-14d	N=2-10 mm h ⁻¹	-0.94	0.15	-0.89	-0.16	0.14	-0.31
>14d	N=2-10 mm h ⁻¹	-0.39	0.15	-0.59	-0.06	0.14	-0.14
0-24h	Temp.	0.008	0.002	0.02	0.006	0.001	0.01
1-14d	Temp.	0.019	0.003	0.05	0.013	0.002	0.03
>14d	Temp.	0.025	0.003	0.06	0.019	0.002	0.04
0-24h	log(Wind)	0.99	0.04	0.10	0.83	0.03	0.08
1-14d	log(Wind)	0.95	0.06	0.09	0.87	0.05	0.09
>14d	log(Wind)	0.87	0.06	0.09	0.92	0.05	0.09

*Basis: Fst≤1m, N=0 mm h⁻¹, Temp.=0°C, Wind=1 m s⁻¹

Temperatur: die Emissionen zeigen beim Lager ohne Abdeckung eine grössere Abhängigkeit von der Temperatur (RelEff_ohne: +2 bis +6% pro °C Änderung) im Vergleich zum Lager mit Abdeckung (RelEff_mit: +1 bis +4% pro °C Änderung). Dies erscheint als plausibel, denn die Abdeckung dürfte Temperaturschwankungen ausgleichen und etwa eine Erwärmung der Gülleoberfläche durch Sonneneinstrahlung zumindest teilweise unterbinden.

Die Wirkung der emissionsrelevanten Einflussgrössen ist ähnlich wie im direktem Vergleich gemäss Kap. 3.6.3.1 dargestellt. Die Analyse der gesamten Messperiode mittels Regressionsanalyse ergibt eine eindeutige Emissionsminderung durch die Abdeckung. Sie beträgt über die ganze Messdauer mit Abdeckung 32% (Werte für die einzelnen Jahre mit mindestens 6 Monaten Messdauer: 2015: 35%; 2016: 26%; 2017: 36%). Diese Werte sind tiefer als die in Kap. 3.6.3.1 mittels direktem Vergleich errechneten Zahlen. Sie können diesen allerdings nicht gleichgestellt werden, da für die Zeit nach einem Rührereignis nur eine weniger feine Auslösung möglich war (3 Gruppen Regressionsanalyse gegenüber 51 Gruppen direkter Vergleich)⁹. Für die Angabe der Emissionsminderung werden daher nur die Werte vom direkten Vergleich verwendet.

3.6.3.3 Gemessene Emissionsminderung im Vergleich zu Daten aus der Literatur

Im Rahmen einer laufenden Literaturstudie (vgl. Tabelle 8) wurden Daten zur Emissionsminderung aufgrund der Abdeckung vom Lagerbehältern für Gülle zusammengestellt. Diese

⁹ Diese weniger feine Auflösung war für die Durchführung einer Regressionsanalyse notwendig, da andernfalls die Effektgrössen nicht dargestellt werden können.

sind für undurchlässige Schwimmfolien in Tabelle 14 zusammen mit den in dieser Studie ermittelten Werten aufgeführt.

Tabelle 14: Einfluss einer undurchlässigen Schwimmfolie zur Abdeckung von Lagerbehältern für Rindvieh- und Schweinegülle auf die Emissionen von NH₃ im Vergleich zu einem ungedeckten Lager. G: Gülletyp; R: Rindviehgülle unbehandelt; S: Schweinegülle unbehandelt n: Anzahl Werte; S: Typ Studie: U: unter Umweltbedingungen; P: Pilotanlage; L: Laborversuch

Mittelwert	Minimum	Maximum	G	n	S	Quelle
Daten von Untersuchungen						
46%	12% / -500%	81% / 85%	-	-	-	Diese Studie*
-	-	-	R	-	U	-
66%	43%	93%	R	4	P	De Bode (1991), Sommer et al. (1993)
85%	-	-	R	1	L	Huther et al. (1997)
99%	99%	100%	S		U	Dinuccio et al. (2015), Hörnig et al. (1999)**
82%	54%	98%	S	4	P	De Bode (1991), Sommer et al. (1993)
90%	85%	99%	S	4	L	Matulaitis et al. (2015), Portejoie et al. (2003)
Daten aus publizierten Literaturreviews oder in Modellen verwendete Werte						
80%	59%	95%	R/S			VanderZaag et al. (2015)***
60%	-	-	R/S			UNECE (2014) [#]
80%	-	-	R/S			Kupper, Menzi (2013) ^{##}

* Diese Studie: mittlerer Wert der in den Kap. 3.6.3.1 und 3.6.3.2 ermittelten Emissionsreduktion; Minima, Maxima gemäss Anhang 7.6, Tabelle 26; Minimum, Maximum links/rechts: Wert bei Trockenwetter/Wert mit Niederschlag

** Diese Werte sind aufgrund der Messung mittels Kammersystemen stark in Frage zu stellen.

*** Konservativer Schätzwert, von dem die Autoren ausgehen, dass er in der Praxis während der Lebensdauer der Abdeckung erreicht werden kann

[#] Wert gemäss Leitfaden der UNECE (der Leitfaden soll die Vertragsparteien des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) dabei anleiten, Massnahmen zur Verringerung der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft festzulegen).

^{##} Wert verwendet zur Emissionsmodellierung mittels Agrammon (www.agrammon.ch)

Die in der vorliegenden Studie ermittelte Emissionsreduktion ist niedriger als die in der Literatur gefundenen Werte. Diese Differenz ist plausibel und dürfte auf die folgenden Ursachen zurückzuführen sein:

- Die in der vorliegenden Studie untersuchte Abdeckung weist in der Mitte eine Öffnung von 4.5 m auf, was rund 4% der gesamten Fläche der Abdeckung entspricht. Weiter gibt es Lücken zwischen der Behälterwand und Folienrand. Von der ungedeckten Fläche wird Ammoniak wie von einem ungedeckten Lager emittiert.
- Bisher wurden nur vollständig schwimmende Abdeckungen des Typs Schwimmfolie untersucht. Bei der untersuchten teilschwimmenden Folie ist der Luftaustausch höher wegen der Öffnungen und des Luftraums zwischen der Gülleoberfläche und der Folie. Zudem kann der Luftaustausch verstärkt werden, wenn sich die Folie bei Sonneneinstrahlung erwärmt.

Andererseits sind die Daten aus der Literatur kritisch zu hinterfragen. Die meisten Studien wurden bisher im Pilot- oder Labormassstab durchgeführt. Man kann davon ausgehen, dass solche Studien nur begrenzt geeignet sind, um die unter Umweltbedingungen vorherrschenden Verhältnisse und Einflussfaktoren adäquat abzubilden:

- In Labor- und Pilotanlagen lässt sich die unter Praxisbedingungen sehr komplexe Bewirtschaftung eines Güllelagers (vgl. Kap. 3.3) nicht adäquat simulieren.
- Wegen der niedrigen Füllhöhe (fast immer weniger als 1 m) ist die Bildung einer Schwimmschicht weniger ausgeprägt. Bei Abwesenheit oder schwacher Ausbildung einer Schwimmschicht ist die emissionsmindernde Wirkung der Abdeckung grösser, wie die

vorliegende Studie gezeigt hat (Abbildung 20, Anhang 7.6, Tabelle 26). Dies würde die höheren Werte hinsichtlich Emissionsminderung von Studien im Pilot- oder Labormassstab zumindest teilweise erklären. Andererseits wird in Labor- oder Pilotstudien die Gülle in der Regel nicht gerührt. Dies erleichtert die Ausbildung einer Schwimmschicht und könnte den gegenteiligen Effekt der niedrigen Füllhöhe zumindest teilweise kompensieren.

- Die von Dinuccio et al. (2015) und Hörnig et al. (1999) in Studien unter Umweltbedingungen eingesetzten Kammersysteme können die Heterogenität der Gülleoberfläche kaum erfassen. Weiter bestehen Wechselwirkungen zwischen Kammer und der emittierenden Oberfläche, welche die Emissionen beeinflussen (vgl. auch Ogink et al., 2013). In diesem Sinne erscheinen die in Tabelle 14 angegebenen sehr hohen Werte zur Emissionsreduktion von Dinuccio et al. (2015) und Hörnig et al. (1999) als wenig plausibel.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung über insgesamt mehr als drei Jahre generierte eine umfangreiche Messreihe von NH_3 -Emissionen, welche eine fundierte Auswertung der Messdaten ermöglichte. Dabei wurde der Betrieb eines Güllelagers dokumentiert, der dessen Emissionsverhalten in komplexer Weise beeinflusst, sowie die emissionsmindernde Wirkung einer Abdeckung mittels teilschwimmenden Folie erstmals untersucht.

Die Messungen vom ungedeckten Lagerbehälter zeigten mittlere Emissionen von $0.07 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Die maximalen Werte erreichten rund $1.5 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Mittlere gemessene NH_3 -Werte vom ungedeckten Lager sind vergleichbar mit Emissionsraten aus der Literatur. Die Emissionen vom abgedeckten Lager lagen im Mittel bei $0.05 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Maximum: $0.46 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Da die Messungen beim Lagerbehälter vor und nach der Abdeckung nicht parallel durchgeführt werden konnten, wurden parallel zwei verschiedene Methoden zur Datenanalyse erarbeitet und durchgeführt. Damit liess sich eine Emissionsminderung von 46% aufgrund der teilschwimmenden Folie eindeutig belegen. Werte aus der Literatur betragen für vollständig schwimmende Folien rund 60% bis 80%. Die Differenz dürfte auf die Öffnung in der Mitte der Folie und den höheren gasförmigen Austausch an der emittierenden Oberfläche aufgrund des Luftraums zwischen Gülleoberfläche und Folie zurückzuführen sein.

Die Resultate zeigen weiter, dass die Höhe der Emissionen stark vom Zustand der Schwimmschicht abhängt, was Befunde von früheren Studien bestätigt. Dabei sind Emissionsspitzen zum Zeitpunkt von Rühren/Befüllen nicht entscheidend, da die entsprechenden Zeitperioden relativ kurz sind. Viel wichtiger ist die anschliessende Zeitdauer von rund 14 Tagen, bis sich die Schwimmschicht wiederaufgebaut hat. Aufgrund der häufigen Zerstörung der Schwimmschicht, entfielen beim hier untersuchten ungedeckten Lager 62% der gesamten Jahresemission auf Perioden ohne intakte Schwimmschicht, wobei diese Zeit nur 41% des Jahres umfasste. Die untersuchte teilschwimmende Folie zeigte gerade für diese Perioden ohne Schwimmschicht eine hohe Emissionsreduktion von bis zu rund 80%. In Zeitabschnitten mit Schwimmschicht war die Emissionsminderung der Abdeckung niedrig, bei hoher Niederschlagsintensität sogar negativ. Diese sind für die Gesamtemissionen aber von untergeordneter Bedeutung, da bei diesen Rahmenbedingungen die Emissionen niedrig sind und/oder wenig häufig vorkommen.

Obwohl die Emissionsreduktion der teilschwimmenden Folie im Vergleich zu Literaturwerten von vollständig schwimmenden Folien wie erwartet tiefer lag, sind die Letzteren kritisch zu hinterfragen. Es gibt verschiedene Faktoren, die zu einer Überschätzung der Emissionsminderung aufgrund einer Abdeckung führen könnten: (i) fehlende oder weniger gut ausgebildete Schwimmschicht bei Labor- und Pilotstudien; unter solchen Bedingungen

weist die untersuchte teilschwimmende Folie Werte von rund 80% Emissionsminderung auf. (ii) Kammersysteme, die in Studien unter Umweltbedingungen oft eingesetzt werden, können die Heterogenität der Gülleoberfläche kaum erfassen.

Die Emissionsreduktion aufgrund der eingesetzten teilschwimmenden Abdeckung von 46% liegt im Bereich der Wirksamkeit von andern emissionsmindernden Techniken. Bei Gülle mit einer geringeren Ausbildung einer Schwimmschicht (z.B. Schweinegülle), wird eine grössere Emissionsminderung erwartet. Im Hinblick auf eine Optimierung der Emissionsreduktion von Güllelagerabdeckungen sollte geprüft werden, ob Systeme mit einem niedrigeren Austausch mit der Umgebungsluft möglich sind. Weiter würden sich die Emissionen mit einer Verminderung der Rührvorgänge zusätzlich reduzieren lassen.

5. Dank

Roy Eugster und Jörg Sintermann (AWEL) sei für die Erhebung aller Messdaten und Ihre weitreichenden fachlichen Inputs gedankt. Dem Leiter und den Mitarbeitern des Betriebs danken wir für die Zusammenarbeit im Rahmen des vorliegenden Projekts. Unser Dank richtet sich auch an Albrecht Neftel (Neftel Research Expertise) für die wertvollen Diskussionen bei der Interpretation der Daten.

6. Literatur

- Agafonkin, V., Thieurmel, B. 2018. Compute Sun Position, Sunlight Phases, Moon Position and Lunar Phase. R package version 0.4. <https://CRAN.R-project.org/package=suncalc> (24.08.2018)
- Aguerre, M.J., Wattiaux, M.A., Hunt, T., Lobos, N.E. 2012. Effect of nitrogen content and additional straw on changes in chemical composition, volatile losses, and ammonia emissions from dairy manure during long-term storage. *J. Dairy Sci.* 95(6): 3454-3466.
- BAFU, BLW. 2016. Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Umwelt-Wissen Nr. 1633. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW).
- BAFU, BLW. 2011. Baulicher Umweltschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1101. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Baldé, H., VanderZaag, A.C., Burtt, S.D., Wagner-Riddle, C., Evans, L., Gordon, R., Desjardins, R.L., MacDonald, J.D. 2018. Ammonia emissions from liquid manure storages are affected by anaerobic digestion and solid-liquid separation. *Agric. Forest Meteorol.* 258: 80-88.
- De Bode, M.J.C. 1991. Odour and ammonia emissions from manure storage. In: Nielsen, V. C., Voorburg, J. H., L'Hermite, P., (eds.). *Livestock Farming*. London, England: Elsevier Applied Science. pp 59-66.
- Denmead, O.T., 1983. Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field, in: Freney, J. R., Simpson, J. R. (Eds.), *Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems*. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, Netherlands, pp. 131-157.
- Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F. 2015. Reduction of gaseous emission from pig slurry storage tanks by different covering materials. 16th RAMIRAN International Conference. 8-10 September 2015, Hamburg Germany.
- EEA. 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxembourg: European Environment Agency.
- Fritsch, F.N., Carlson, R.E. 1980. Monotone piecewise cubic interpolation. *Siam J. Numer. Anal.* 17(2): 238-246.
- Grant, R.H., Boehm, M.T. 2015. Manure ammonia and hydrogen sulfide emissions from a Western dairy storage basin. *J. Environ. Qual.* 44(1): 127-136.
- Harper, L.A., Denmead, O.T., Flesch, T.K. 2011. Micrometeorological techniques for measurement of enteric greenhouse gas emissions. *Anim. Feed. Sci. Tech.* 166-67: 227-239.
- Huther, L., Schuchardt, F., Willke, T. 1997. Emissions of ammonia and greenhouse gases during storage and composting of animal manures. In: Voermans, J. A. M., Monteny, G. J., (eds.). *Rosmalen*. p 327-334.
- Hörnig, G., Turk, M., Wanka, U. 1999. Slurry covers to reduce ammonia emission and odour nuisance. *J. Agr. Eng. Res.* 73(2): 151-157.
- KOLAS. 2012. Abdeckung bestehender offener Güllelager. Empfehlungen der KOLAS und des BLW zur Umsetzung einzelbetrieblicher Massnahmen im Rahmen von Ammoniak-Ressourcenprojekten. Konferenz der Landwirtschaftsämter der Schweiz (KOLAS) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). www.blw.admin.ch/themen/00364/01408/index.html?lang=de.. (21.10.2015).

- Kupper T., 2016. Ammoniakemissionen aus der Lagerung von Gülle mit und ohne Abdeckung - Literaturstudie. Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, CH-3052 Zollikofen, p. 39.
- Kupper, T., Bonjour, C., Menzi, H. 2015. Evolution of farm and manure management and their influence on ammonia emissions from agriculture in Switzerland between 1990 and 2010. *Atmos. Environ.* 103(0): 215-221.
- Kupper, T., Bonjour, C., Achermann, B., Rihm, B., Zaucker, F., Menzi, H. 2013. Ammoniakemissionen in der Schweiz: Neuberechnung 1990-2010. Prognose bis 2020. URL: <http://www.agrammon.ch/dokumente-zum-download/> (26.10.2016). Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen.
- Kupper, T., Menzi, H. 2013. Technische Parameter Modell Agrammon (<http://www.agrammon.ch/dokumente-zum-download/>). Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen.
- Matulaitis, R., Juskiene, V., Juska, R. 2015. The effect of floating covers on gas emissions from liquid pig manure. *Chil. J. Agricult. Res.* 75(2): 232-238.
- Menzi, H., Klossner, M., Kupper, T., Achermann, B. 2014. Historical development of ammonia emissions and nitrogen flows related to Swiss agriculture. In: Cordovil, C., (eds.. 18th Nitrogen Workshop; Lisbon Portugal, 30th June - 3rd July 2014. p 315-316.
- Misselbrook, T.H., Brookman, S.K.E., Smith, K.A., Cumby, T., Williams, A.G., McCrory, D.F. 2005. Crusting of stored dairy slurry to abate ammonia emissions: pilot-scale studies. *J. Environ. Qual.* 34(2): 411-419.
- Ogink, N.W.M., Mosquera, J., Calvet, S., Zhang, G. 2013. Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosyst. Eng.* 116(3): 297-308.
- Petersen, S.O., Dorno, N., Lindholm, S., Feilberg, A., Eriksen, J. 2013. Emissions of CH₄, N₂O, NH₃ and odorants from pig slurry during winter and summer storage. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 95(1): 103-113.
- Portejoie, S., Martinez, J., Guiziou, F., Coste, C.M. 2003. Effect of covering pig slurry stores on the ammonia emission processes. *Bioresource Technol.* 87(3): 199-207.
- Reidy, B., Dammgen, U., Dohler, H., Eurich-Menden, B., Van Evert, F.K., Hutchings, N.J., Luesink, H.H., Menzi, H., Misselbrook, T.H., Monteny, G.J., Webb, J. 2008. Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in Europe: Liquid manure systems. *Atmos. Environ.* 42(14): 3452-3464.
- Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähler, M., Menzi, H. 2017. 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern. In: Richner, W., Sinaj, S., (eds.). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz / GRUD 2017. Agrarforschung Schweiz 8 (6) Spezialpublikation. pp 4/1-4/23.
- Sintermann J., Dietrich K., Häni C., Bell M.J., Jocher M., Neftel A., 2016. A miniDOAS instrument optimised for ammonia field measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 9, 2721-2734.
- Smith, K., Cumby, T., Lapworth, J., Misselbrook, T., Williams, A. 2007. Natural crusting of slurry storage as an abatement measure for ammonia emissions on dairy farms. *Biosyst. Eng.* 97(4): 464-471.
- Sommer, S.G., Christensen, B.T., Nielsen, N.E., Schjorring, J.K. 1993. Ammonia volatilization during storage of cattle and pig slurry - effect of surface cover. *J. Agric. Sci.* 121: 63-71.

- Sommer, S.G., Zhang, G.Q., Bannink, A., Chadwick, D., Misselbrook, T., Harrison, R., Hutchings, N.J., Menzi, H., Monteny, G.J., Ni, J.Q., Oenema, O., Webb, J. 2006. Algorithms determining ammonia emission from buildings housing cattle and pigs and from manure stores. *Advan. Agron.* 89: 261-335.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman J.W., Bealey J.W., Billen G., Bleeker, A., Bouwman A., Grennfelt, G., van Grinsven, H. & Grizzetti G. 2011. The challenge to integrate nitrogen science and policies. In: Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B., (eds.. *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives.* Cambridge Cambridge University Press. pp 82-96.
- Thöni L., Seitler E., 2015. Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2014. FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung, Rapperswil, p. 80.
- UNECE. 2014. Guidance document for preventing and abating ammonia emissions from agricultural sources. Paper ECE/EB.AIR/120, February 7, 2014. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).
- VanderZaag, A., Amon, B., Bittman, S., Kuczynski, T. 2015. Ammonia abatement with manure storage and processing techniques. In: Reis, S., Howard, C., Sutton, M. A., (eds.. *Costs of ammonia abatement and the climate co-benefits.* Springer Netherlands. pp 75-112.
- VanderZaag, A.C., Gordon, R.J., Glass, V.M., Jamieson, R.C. 2008. Floating covers to reduce gas emissions from liquid manure storages: a review. *Appl. Eng. Agric.* 24(5): 657-671.
- Wood, J.D., Gordon, R.J., Wagner-Riddle, C., Dunfield, K.E., Madani, A. 2012. Relationships between dairy slurry total solids, gas emissions, and surface crusts. *J. Environ. Qual.* 41(3): 694-704.

7. Anhang

7.1 Gesamtschweizerische Ammoniakemissionen 2010

Tabelle 15: Ammoniakemissionen der Schweiz im Jahr 2010 in kt NH₃-N sowie Anteil der einzelnen Kategorien an den Emissionen aus der Tierproduktion bzw. aus der Landwirtschaft (bei der Summierung gerundeter Zahlen innerhalb der Tabelle können Rundungsdifferenzen auftreten)

	Ammoniakemissionen	Anteil von Emissionen der Tierproduktion	Anteil von Emissionen Landwirtschaft	Anteil von totalen Emissionen
Tierproduktion	kt NH ₃ -N	%		
Milchkühe	21.2			
Mutterkühe	2.8			
Aufzuchtrinder unter 1-jährig	1.9			
Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	2.5			
Aufzuchtrinder über 2-jährig	2.0			
Mastkälber	0.5			
Mutterkuhkälber	1.0			
Masttiere Rindviehmast	1.8			
Total Rindvieh	33.9	78	70	65
Säugende Sauen	0.6			
Galtsauen	1.0			
Ferkel abgesetzt bis 25 kg	0.7			
Eber	0.0			
Mastschweine/Remonten	4.2			
Total Schweine	6.5	15	13	12
Legehennen	0.7			
Junghennen	0.1			
Mastpoulets	0.7			
Masttruten	0.0			
Anderes Geflügel	0.0			
Total Geflügel	1.5	3	3	3
Pferde über 3-jährig	0.5			
Pferde unter 3-jährig	0.1			
Ponys, Kleinpferde, Esel, Maultiere, Maulesel jeden Alters	0.1			
Total Pferde und andere Equiden	0.7	2	1	1
Schafe	0.7			
Milchschafe	0.1			
Ziegen	0.2			
Total Kleinwiederkäuer	1.0	2	2	2
Andere Raufutter verzehrende Nutztiere	0.0			
Total Tierproduktion	43.5	100	90	82
Pflanzenbau				
Mineralische Stickstoffdünger	2.0			
Recyclingdünger	0.4			
Landwirtschaftsflächen	2.4			
Total Pflanzenbau	4.8		10	10
Total Landwirtschaft	48.3		100	92
Total nicht-landwirtschaftliche Emissionen	3.9			7
Total anthropogene Emissionen	52.3			99
Total natürliche Emissionen	0.6			1
Total anthropogene und natürliche Emissionen	52.8			100

7.2 Betrieb des Güllelagerbehälters

Tabelle 16: Dauer Rühren des Güllelagerbehälters mittels Rührwerk und Anzahl Rührvorgänge pro Tag sowie statistische Kennzahlen ganz unten in der Tabelle. Die Tabelle zeigt beispielhaft in detaillierter Form, wie das Rührwerk zwischen Frühjahr 2015 und 2017 betrieben wurde. Die Daten beziehen sich auf einen Teil der Messperiode vom ungedeckten Lagerbehälter.

Datum	Dauer Rühren	Anzahl Rührvorgänge	Datum	Dauer Rühren	Anzahl Rührvorgänge
11.03.2015	13h50	2	14.03.2016	1h00	1
12.03.2015	9h30	2	09.05.2016	14h30	1
13.03.2015	2h30	2	10.05.2016	5h40	2
14.03.2015	2h50	3	11.05.2016	2h50	5
16.03.2015	2h20	3	04.07.2016	8h00	3
22.04.2015	5h10	4	11.07.2016	4h40	5
23.04.2015	20	1	12.07.2016	1h00	1
13.05.2015	2h30	1	18.07.2016	1h40	1
15.05.2015	1h10	1	19.07.2016	40	1
18.05.2015	50	2	04.08.2016	5h10	4
06.07.2015	40	1	06.08.2016	3h20	6
07.07.2015	1h00	1	02.09.2016	1h30	1
30.07.2015	4h40	2	28.10.2016	5h50	2
14.08.2015	8h10	2	29.10.2016	5h00	2
15.08.2015	3h10	2	25.11.2016	1h10	1
14.09.2015	3h10	1	26.11.2016	30	1
17.09.2015	1h20	1	21.12.2016	20	1
29.10.2015	1h20	1	25.02.2017	14h20	1
30.10.2015	6h30	2	27.02.2017	8h40	2
31.10.2015	40	1	03.03.2017	2h20	1
17.11.2015	1h20	1	16.03.2017	40	1
22.02.2016	5h10	1	18.03.2017	1h00	1
12.03.2016	5h20	1	22.03.2017	50	1
13.03.2016	2h30	1	23.03.2017	1h10	1
Anzahl ganze Messperiode				-	48
Summe ganze Messperiode				177h50	85
Mittelwert ganze Messperiode				3h42	-
Median ganze Messperiode				2h30	-
Minimum ganze Messperiode				20	-
Maximum ganze Messperiode				14h30	-

Tabelle 17: Dauer Befüllen des Güllelagerbehälters und Anzahl Befüllungen pro Tag sowie statistische Kennzahlen ganz unten in der Tabelle. Die Tabelle zeigt beispielhaft in detaillierter Form, wie das Lager zwischen Frühjahr 2015 und 2017 befüllt wurde. Die Daten beziehen sich auf einen Teil der Messperiode vom ungedeckten Lagerbehälter.

Datum	Dauer Befüllen	Anzahl Befüllvorgänge	Datum	Dauer Befüllen	Anzahl Befüllvorgänge
02.02.2015	2h30	1	03.05.2016	2h10	1
16.02.2015	6h50	1	14.05.2016	1h00	1
28.02.2015	7h20	1	17.05.2016	2h00	1
14.03.2015	40	1	30.05.2016	1h50	1
31.03.2015	3h30	1	10.06.2016	50	1
07.04.2015	7h00	1	14.06.2016	1h00	1
20.04.2015	4h00	1	18.06.2016	1h30	1
30.04.2015	1h20	1	01.07.2016	40	1
04.05.2015	1h30	1	09.07.2016	1h30	1
13.05.2015	4h00	1	18.07.2016	1h20	1
23.05.2015	2h60	1	25.07.2016	1h00	1
08.06.2015	3h30	2	04.08.2016	1h00	1
18.06.2015	2h10	1	20.08.2016	1h40	1
07.07.2015	4h20	1	23.08.2016	1h20	1
03.08.2015	2h60	2	03.09.2016	1h20	1
13.08.2015	1h20	1	07.09.2016	2h10	1
14.08.2015	40	1	27.09.2016	1h30	1
31.08.2015	2h10	1	13.10.2016	2h00	1
14.09.2015	3h40	1	25.10.2016	1h40	1
05.10.2015	4h30	1	29.10.2016	30	1
13.10.2015	6h50	1	12.11.2016	1h00	1
26.10.2015	5h20	1	18.11.2016	1h20	1
12.11.2015	6h50	1	26.11.2016	1h50	1
01.12.2015	3h10	1	10.12.2016	1h30	1
29.12.2015	6h20	1	21.12.2016	2h10	1
10.01.2016	1h00	1	30.12.2016	50	1
11.01.2016	3h10	2	12.01.2017	1h30	1
23.01.2016	7h30	1	30.01.2017	2h30	1
30.01.2016	1h50	1	31.01.2017	1h40	1
05.02.2016	2h30	1	06.02.2017	1h20	1
13.02.2016	2h00	1	17.02.2017	2h30	1
25.02.2016	4h20	1	23.02.2017	1h30	1
05.03.2016	4h50	1	09.03.2017	1h30	1
11.03.2016	2h00	1	23.03.2017	1h50	1
12.04.2016	4h00	1	30.03.2017	1h20	1
23.04.2016	1h20	1	16.04.2017	40	1
28.04.2016	1h20	1	-	-	-
Anzahl ganze Messperiode				-	73
Summe ganze Messperiode				182h10	76
Mittelwert ganze Messperiode				2h30	-
Median ganze Messperiode				1h50	-
Minimum ganze Messperiode				30	-
Maximum ganze Messperiode				7h30	-

Tabelle 18: Dauer Entleeren des Güllelagerbehälters und Anzahl Entleerungen pro Tag sowie statistische Kennzahlen ganz unten in der Tabelle. Die Tabelle zeigt beispielhaft in detaillierter Form, wie das Lager zwischen Frühjahr 2015 und 2017 entleert wurde. Die Daten beziehen sich auf einen Teil der Messperiode vom ungedeckten Lagerbehälter.

Datum	Dauer Entleeren	Anzahl Entleervorgänge	Datum	Dauer Entleeren	Anzahl Entleervorgänge
11.03.2015	6h30	3	09.05.2016	10h60	1
12.03.2015	6h50	3	10.05.2016	8h40	2
13.03.2015	1h00	1	11.05.2016	9h60	4
14.03.2015	3h30	3	04.07.2016	8h10	2
16.03.2015	4h50	1	11.07.2016	6h30	4
17.03.2015	3h40	2	12.07.2016	4h50	2
22.04.2015	11h40	2	18.07.2016	1h20	1
23.04.2015	4h50	1	19.07.2016	1h20	1
13.05.2015	4h20	1	04.08.2016	7h20	1
15.05.2015	2h30	1	06.08.2016	4h00	3
18.05.2015	2h60	1	02.09.2016	2h60	1
20.07.2015	1h00	1	03.09.2016	4h50	3
30.07.2015	3h40	2	28.10.2016	5h50	2
14.08.2015	8h00	2	29.10.2016	10h00	4
15.08.2015	6h20	2	25.11.2016	1h40	1
14.09.2015	2h30	1	26.11.2016	7h20	3
17.09.2015	3h60	1	21.12.2016	5h00	3
29.10.2015	1h20	1	25.02.2017	4h20	2
30.10.2015	3h40	2	27.02.2017	7h50	2
31.10.2015	3h40	2	03.03.2017	3h00	1
17.11.2015	5h20	2	04.03.2017	40	1
22.02.2016	5h20	1	17.03.2017	1h20	2
12.03.2016	5h20	1	18.03.2017	3h00	2
14.03.2016	4h50	2	22.03.2017	1h00	1
15.03.2016	1h20	1	-	-	-
Anzahl ganze Messperiode				-	49
Summe ganze Messperiode				228h10	89
Mittelwert ganze Messperiode				4h40	-
Median ganze Messperiode				4h20	-
Minimum ganze Messperiode				40	-
Maximum ganze Messperiode				11h40	-

7.3 Gemessene Höhe der Schwimmschicht auf der Gülleoberfläche

Tabelle 19: Güllelagerbehälter ohne Abdeckung: Datum der Messung der Schwimmschichthöhe, Schwimmschichthöhe in cm. Zusätzlich angegeben ist das Datum des letzten Rührens des Lagerbehälters vor der Messung der Schwimmschichthöhe sowie die Anzahl dazwischenliegender Tage

Datum Messung Schwimmschichthöhe	Schwimmschichthöhe in cm	Datum letztes Rühren vor der Messung Schwimmschichthöhe	Anzahl Tage zwischen letztem Rühren und der Messung Schwimmschichthöhe
30.08.2016	15.0	06.08.2016	24.1
06.09.2016	10.0	02.09.2016	4.6
13.09.2016	17.5	02.09.2016	11.5
20.09.2016	18.0	02.09.2016	18.4
27.09.2016	14.0	02.09.2016	25.4
04.10.2016	15.0	02.09.2016	32.4
11.10.2016	17.5	02.09.2016	39.4
18.10.2016	23.0	02.09.2016	46.5
25.10.2016	24.0	02.09.2016	53.4
01.11.2016	0.0	29.10.2016	3.5
08.11.2016	0.0	29.10.2016	10.5
15.11.2016	5.0	29.10.2016	17.5
22.11.2016	9.0	29.10.2016	24.5
29.11.2016	0.0	26.11.2016	3.5
06.12.2016	0.0	26.11.2016	10.4
13.12.2016	5.0	26.11.2016	17.5
20.12.2016	5.0	26.11.2016	24.5
27.12.2016	0.0	21.12.2016	6.4
03.01.2017	9.0	21.12.2016	13.6
31.01.2017	20.0	21.12.2016	41.4
07.02.2017	25.0	21.12.2016	48.5
14.02.2017	25.0	21.12.2016	55.5
21.02.2017	25.0	21.12.2016	62.5
28.02.2017	0.0	27.02.2017	1.5
07.03.2017	0.0	27.02.2017	8.4
14.03.2017	12.5	03.03.2017	11.6
21.03.2017	3.0	18.03.2017	3.4
28.03.2017	5.0	23.03.2017	5.4
04.04.2017	20.0	23.03.2017	12.4
11.04.2017	20.0	23.03.2017	19.4
18.04.2017	20.0	23.03.2017	26.4
Mittelwert	11		

Tabelle 20: Güllelagerbehälter mit Abdeckung: Datum der Messung der Schwimmschichthöhe, Schwimmschichthöhe in cm. Zusätzlich angegeben ist das Datum des letzten Rührens des Lagerbehälters vor der Messung der Schwimmschichthöhe sowie die Anzahl dazwischenliegender Tage. Die Höhe der Schwimmschicht wurde wöchentlich gemessen. Soweit Daten fehlen (z.B. 27.06.2017), war eine Messung nicht möglich wegen Rühren, zu tiefem Füllstand oder gefrorener Schwimmschicht

Datum Messung Schwimmschichthöhe	Schwimmschichthöhe in cm	Datum letztes Rühren vor der Messung Schwimmschichthöhe	Anzahl Tage zwischen letztem Rühren und der Messung Schwimmschichthöhe
20.06.2017	2	19.05.2017	32.1
11.07.2017	3	28.06.2017	13.0
18.07.2017	3	28.06.2017	20.0
17.08.2017	20	03.08.2017	14.3
22.08.2017	15	03.08.2017	19.1
29.08.2017	15	03.08.2017	26.2
12.09.2017	32.5	05.09.2017	7.1
19.09.2017	22.5	05.09.2017	14.1
26.09.2017	32.5	05.09.2017	21.1
03.10.2017	30	05.09.2017	28.1
10.10.2017	12.5	07.10.2017	2.8
15.11.2017	7.5	19.10.2017	26.8
21.11.2017	15	19.10.2017	32.8
28.11.2017	2.5	23.11.2017	4.8
05.12.2017	5	30.11.2017	4.6
12.12.2017	12.5	30.11.2017	11.6
19.12.2017	10	30.11.2017	18.7
26.12.2017	15	30.11.2017	25.6
02.01.2018	15	29.12.2017	4.0
09.01.2018	15	29.12.2017	11.0
17.01.2018	20	29.12.2017	19.1
30.01.2018	20	29.12.2017	31.9
06.02.2018	0	31.01.2018	5.7
13.03.2018	22.5	31.01.2018	40.7
20.03.2018	2.5	17.03.2018	2.8
27.03.2018	2.5	24.03.2018	2.9
03.04.2018	15	24.03.2018	9.8
10.04.2018	20	24.03.2018	16.9
18.04.2018	45	24.03.2018	24.9
24.04.2018	0	21.04.2018	2.6
Mittelwert	14		

7.4 Vorliegen einer Schwimmschicht auf der Gülleoberfläche

Tabelle 21: Zeitperioden (P) mit und ohne Schwimmschicht auf der Gülleoberfläche des Güllelagerbehälters ohne Abdeckung.

Zeitperioden mit Schwimmschicht sind wie folgt definiert: Messintervalle ohne Rühren des Lagerbehälters, Dauer bis zum letzten vormaligen Rühren: >14 Tage;

Zeitperioden ohne Schwimmschicht sind wie folgt definiert: Messintervalle mit Rühren des Lagerbehälters plus anschliessende 14 Tage

p	Schwimmschicht vorhanden	Schwimmschicht nicht vorhanden			
1	x		07.03.2016	bis<	12.03.2016
1		x	12.03.2016	bis≤	28.03.2016
2	x		28.03.2016	bis<	09.05.2016
2		x	09.05.2016	bis≤	25.05.2016
3	x		25.05.2016	bis<	04.07.2016
3		x	04.07.2016	bis≤	02.08.2016
4	x		02.08.2016	bis<	04.08.2016
4		x	04.08.2016	bis≤	20.08.2016
5	x		20.08.2016	bis<	02.09.2016
5		x	02.09.2016	bis≤	16.09.2016
6	x		16.09.2016	bis<	29.10.2016
6		x	29.10.2016	bis≤	12.11.2016
7	x		12.11.2016	bis<	25.11.2016
7		x	25.11.2016	bis≤	10.12.2016
8	x		10.12.2016	bis<	21.12.2016
8		x	21.12.2016	bis≤	04.01.2017
9	x		04.01.2017	bis<	25.02.2017
9		x	25.02.2017	bis≤	06.04.2017

7.5 Nährstoffanalysen der Gülle

Tabelle 22: Nährstoffgehalte der Gülle von 3 Proben ohne und 2 Proben mit Abdeckung des Güllelagerbehälters sowie Vergleich mit den Normwerten für Vollgülle Rindvieh, umgerechnet auf 1:1-Verdünnung gemäss Richner et al. (2017)

		Güllelager Tagelswangen						Vollgülle Rindvieh Richner et al. (2017)
Datum Probenahme		14.08.15 (1)	14.08.15 (2)	23.03.17	27.06.17	05.10.17	Mittelwert	
Abdeckung		ohne (o)			mit (m)		o,m	
pH		7.5	7.6	7.3	7.0	7.3	7.3	-
Trockensubstanz	%	3.8	5.8	6.9	4.9	4.1	5.2	4.5
Organ. Substanz	%	67	72	77	79	79	75	77
Gesamtstickstoff	g L ⁻¹	2.41	2.58	3.06	2.26	2.07	2.48	1.95
Ammonium	g L ⁻¹	1.49	1.28	1.50	1.20	1.14	1.32	1.05
Phosphor (P)	g L ⁻¹	-	-	0.50	0.40	0.27	0.39	0.37
Kalium (K)	g L ⁻¹	-	-	3.76	2.72	1.97	2.82	3.10
Calcium	g L ⁻¹	-	-	1.57	1.37	0.98	1.30	0.75
Magnesium	g L ⁻¹	-	-	0.33	0.28	0.21	0.27	0.31
Schwefel	g L ⁻¹	-	-	0.30	0.25	0.18	0.24	-

7.6 Direkter Vergleich der Emissionen vom ungedeckten und abgedeckten Lagerbehälter basierend auf den hinsichtlich emissionsrelevanter Einflussgrößen identischen Kategorien

Tabelle 23: Ammoniakemissionen vom Lagerbehälter mit und ohne Abdeckung (30.01.2015 - 28.05.2018) im Zeitraum 0 bis 24 h nach dem Rühren basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. NH₃ Em.: mittlere NH₃ Emission, SE: Standardfehler der mittleren NH₃ Emission in g NH₃ m² h⁻¹, K: Anzahl direkt vergleichbare Kategorien (Kap. 2.4.2): n: Anzahl 10-Minuten Intervalle., Sig.: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede aufgrund der Abdeckung, Z.n.R.: Zeit nach einem Rührereignis in Tagen, Nied.: Niederschlagsintens. in mm h⁻¹, Fst.: Füllstand in m, T.: Lufttemp. in °C (Messung auf 4.5 m), W.: Windgeschwind. in m s⁻¹ (Messung auf 10 m)

Kategorien				Abdeckung	NH ₃ Em.	SE	K	n	Sig.	Z.n.R.	Nied.	Fst.	T.	W.	
Nied.	Fst.	T.	W.		g NH ₃ m ² h ⁻¹	-	-	-	-	Tage	mm h ⁻¹	m	°C	m s ⁻¹	
0 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.074	0.014	10	485		0.4	0.0	0.5	3.6	0.5	
				mit	0.041	0.008	10	399		0.5	0.0	0.6	4.0	0.5	
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.258	0.031	9	333	*	0.5	0.0	0.4	5.8	1.7	
				mit	0.097	0.009	9	46	*	0.6	0.0	0.4	7.4	1.7	
		>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.100	0.013	18	635	*	0.5	0.0	0.6	21.0	0.5
					mit	0.046	0.006	18	833	*	0.4	0.0	0.6	21.0	0.5
	>10°C		≤1 m s ⁻¹	ohne	0.355	0.021	42	719	*	0.4	0.0	0.6	18.0	2.4	
				mit	0.169	0.010	42	351	*	0.3	0.0	0.6	18.6	2.4	
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.068	0.012	18	403	*	0.3	0.0	2.1	4.4	0.5	
				mit	0.013	0.002	18	343	*	0.2	0.0	2.1	4.1	0.5	
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.248	0.020	36	471	*	0.2	0.0	2.1	4.9	2.2	
				mit	0.047	0.004	36	207	*	0.2	0.0	2.1	3.8	2.2	
		>10°C	>1 m s ⁻¹	ohne	0.086	0.013	18	478	*	0.3	0.0	1.4	21.1	0.5	
				mit	0.020	0.003	18	437	*	0.1	0.0	1.5	21.1	0.5	
	ohne	0.396	0.042	32	431	*	0.4	0.0	1.4	20.4	2.2				
	mit	0.080	0.008	32	261	*	0.1	0.0	1.4	20.6	2.2				
<2 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.012	0.009	2	49		0.4	0.7	0.6	8.5	0.5	
				mit	0.046	0.030	2	5		0.6	0.3	1.0	9.1	0.5	
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											
		>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.033	0.011	8	140		0.5	0.4	0.7	15.0	0.5
					mit	0.022	0.006	8	117		0.5	0.3	0.5	14.6	0.5
	>10°C		≤1 m s ⁻¹	ohne	0.151	0.047	6	25		0.5	0.3	0.7	13.2	2.3	
				mit	0.121	0.044	6	18		0.3	0.2	0.6	15.3	2.3	
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.016	0.005	3	44		0.2	0.4	1.3	19.1	0.5	
				mit	0.015	0.002	3	11		0.4	0.3	1.4	19.5	0.5	
>10°C		>1 m s ⁻¹	ohne	0.023	0.004	3	22		0.4	0.4	1.4	18.4	1.8		
			mit	0.029	0.006	3	8		0.1	0.4	1.3	17.4	1.8		
2-10 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.016		1	13		0.3	3.2	1.0	16.5	0.6	
				mit	0.014		1	1		0.0	2.6	0.7	19.5	0.6	
		>10°C	>1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											
		>10°C	>1 m s ⁻¹	ohne											
				mit											

Tabelle 24: Ammoniakemissionen vom Lagerbehälter mit und ohne Abdeckung (30.01.2015 - 28.05.2018) im Zeitraum 1 bis 14 Tage nach dem Rühren basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. NH₃ Em.: mittlere NH₃ Emission, SE: Standardfehler der mittleren NH₃ Emission in g NH₃ m² h⁻¹, K: Anzahl direkt vergleichbare Kategorien (Kap. 2.4.2), n: Anzahl 10-Minuten Intervalle, S: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede aufgrund der Abdeckung, Z.n.R.: Zeit nach einem Rührereignis in Tagen, Nied.: Niederschlagsintensität in mm h⁻¹, Fst.: Füllstand in m, T.: Lufttemperatur in °C (Messung auf 4.5 m), W.: Windgeschwindigkeit in m s⁻¹ (Messung auf 10 m)

Kategorien				Abdeckung	NH ₃ Em.	SE	K	n	S	Z.n.R.	Nied.	Fst.	T.	W.
Nied.	Fst.	T.	W.											
0 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.037	0.003	65	3158		7.2	0.0	0.5	5.8	0.5
				mit	0.026	0.002	65	2822		7.2	0.0	0.5	6.3	0.5
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.142	0.009	96	1496	*	6.0	0.0	0.5	6.1	2.1
				mit	0.085	0.004	96	1006	*	6.0	0.0	0.5	6.7	2.1
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.050	0.003	157	6164	*	7.7	0.0	0.5	18.4	0.5
				mit	0.030	0.002	157	5768	*	7.8	0.0	0.5	18.2	0.5
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.208	0.007	291	3069	*	7.6	0.0	0.5	18.0	2.2
				mit	0.119	0.003	291	3356	*	7.5	0.0	0.5	18.1	2.2
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.071	0.007	26	407	*	8.4	0.0	1.3	7.4	0.6
				mit	0.019	0.002	26	605	*	8.3	0.0	1.4	7.2	0.5
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.203	0.017	31	297	*	9.7	0.0	1.4	7.7	1.9
				mit	0.061	0.005	31	206	*	9.6	0.0	1.5	6.5	1.9
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.059	0.006	58	1232	*	7.4	0.0	1.3	17.6	0.5
				mit	0.022	0.002	58	1267	*	7.4	0.0	1.4	16.7	0.5
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.281	0.015	84	927	*	8.5	0.0	1.3	16.2	2.2
				mit	0.108	0.007	84	470	*	8.5	0.0	1.4	15.9	2.2
<2 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.017	0.004	20	311		6.4	0.5	0.4	6.5	0.5
				mit	0.021	0.003	20	186		6.5	0.3	0.3	7.0	0.5
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.050	0.007	21	117		7.2	0.3	0.4	5.2	1.9
				mit	0.058	0.004	21	42		7.2	0.4	0.4	5.5	1.8
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.021	0.003	44	720		7.4	0.6	0.6	15.2	0.5
				mit	0.021	0.003	44	279		7.4	0.3	0.5	15.0	0.5
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.071	0.015	26	144		5.6	0.7	0.5	13.9	1.8
				mit	0.082	0.012	26	65		5.5	0.4	0.5	14.6	1.8
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.031		1	2		5.6	0.3	1.3	8.9	0.4
				mit	0.005		1	1		5.5	0.1	1.5	7.5	0.2
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.151		1	1		5.6	0.1	1.3	9.2	1.5
				mit	0.096		1	1		5.4	0.1	1.5	8.6	1.4
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.047	0.028	2	12		1.7	0.7	1.1	14.5	0.4
				mit	0.031	0.010	2	9		1.3	0.2	1.4	12.0	0.4
			>1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										
2-10 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.017	0.005	2	13		5.7	3.0	0.3	8.3	0.6
				mit	0.019	0.005	2	2		5.9	2.0	0.2	8.6	0.6
			>1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.025		1	5		7.2	2.4	0.8	14.1	0.8
				mit	0.006		1	1		7.4	3.0	0.8	13.9	0.6
			>1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										
			>1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										
			>1 m s ⁻¹	ohne										
				mit										

Tabelle 25: Ammoniakemissionen vom Lagerbehälter mit und ohne Abdeckung (30.01.2015 - 28.05.2018) im Zeitraum >14 Tage nach dem Rühren basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. NH₃ Em.: mittlere NH₃ Emission, SE: Standardfehler der mittleren NH₃ Emission in g NH₃ m⁻² h⁻¹, K: Anzahl direkt vergleichbare Kategorien (Kap. 2.4.2), n: Anzahl 10-Minuten Intervalle, S: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede aufgrund der Abdeckung, Z.n.R.: Zeit nach einem Rührereignis in Tagen, Nied.: Niederschlagsintensität in mm h⁻¹, Fst.: Füllstand in m, T.: Lufttemperatur in °C (Messung auf 4.5 m), W.: Windgeschwindigkeit in m s⁻¹ (Messung auf 10 m)

Kategorien				Abdeckung	NH ₃ Em.	SE	K	n	S	Z.n.R.	Nied.	Fst.	T.	W.		
Nied.	Fst.	T.	W.		g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹		-	-	-	Tage	mm h ⁻¹	m	°C	m s ⁻¹		
0 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.032	0.004	23	1051		17.4	0.0	0.7	4.9	0.5		
			mit	0.019	0.003	23	575		17.5	0.0	0.8	5.1	0.5			
		>1 m s ⁻¹	ohne	0.121	0.010	32	337	*	17.3	0.0	0.7	5.0	1.8			
			mit	0.054	0.005	32	316	*	17.4	0.0	0.7	4.9	1.8			
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.040	0.003	98	3188	*	20.6	0.0	0.8	19.7	0.5		
				mit	0.025	0.002	98	4579	*	20.6	0.0	0.8	19.9	0.5		
	>1 m s ⁻¹		ohne	0.138	0.008	176	1977		19.7	0.0	0.8	19.9	2.2			
			mit	0.119	0.006	176	2051		19.7	0.0	0.8	20.2	2.2			
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.023	0.006	24	243		19.5	0.0	2.1	5.5	0.5		
				mit	0.017	0.003	24	386		19.3	0.0	2.1	4.9	0.5		
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.052	0.011	27	216		19.2	0.0	2.3	4.7	1.7		
				mit	0.038	0.003	27	185		19.0	0.0	2.3	4.4	1.7		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.033	0.003	103	1894	*	25.2	0.0	1.4	17.4	0.5		
				mit	0.020	0.002	103	1522	*	25.2	0.0	1.5	17.0	0.5		
			>1 m s ⁻¹	ohne	0.123	0.011	120	1135	*	25.8	0.0	1.4	18.1	1.9		
				mit	0.072	0.004	120	703	*	25.7	0.0	1.5	18.2	1.9		
<2 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne												
			mit													
		>1 m s ⁻¹	ohne													
			mit													
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.019	0.004	16	97		19.3	0.7	0.7	16.3	0.5		
				mit	0.021	0.004	16	53		19.4	0.3	0.8	15.6	0.5		
	>1 m s ⁻¹		ohne	0.066	0.013	13	39		15.8	0.4	0.8	16.1	1.9			
			mit	0.101	0.024	13	45		15.9	0.4	0.8	15.7	1.9			
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.016	0.006	2	3		24.9	0.1	2.4	10.0	0.5		
				mit	0.005	0.003	2	12		24.1	0.3	2.4	7.9	0.5		
			>1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne	0.011	0.004	6	47		27.3	0.4	1.4	16.6	0.6		
				mit	0.005	0.002	6	36		27.4	0.3	1.5	14.8	0.5		
			>1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												
2-10 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne												
			mit													
		>1 m s ⁻¹	ohne													
			mit													
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												
	>1 m s ⁻¹		ohne													
			mit													
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												
			>1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												
			>1 m s ⁻¹	ohne												
				mit												

Tabelle 26: Emissionsreduktion der Ammoniakemissionen vom Lagerbehälter aufgrund der Abdeckung (30.01.2015 - 28.05.2018) in Prozent gegliedert nach Zeitraum 0 bis 24 h, 1 bis 14 Tage und >14 Tage nach dem Rühren basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien: Nied.: Niederschlagsintensität in mm h⁻¹, Fst.: Füllstand in m, T.: Lufttemperatur in °C (Messung auf 4.5 m), W.: Windgeschwindigkeit in m s⁻¹ (Messung auf 10 m); "-" n: kein Vergleich mit ohne Abdeckung möglich

Kategorien				Abdeckung	NH ₃ Emissionsreduktion in Prozent			
Nied.	Fst.	T.	W.		0 bis 24 h	1 bis 14 Tage	> 14 Tage	
0 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	45%	27%	40%		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	54%	41%	37%		
		>1 m s ⁻¹	ohne					
			mit	62%	40%	56%		
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	80%	73%	29%		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	81%	70%	27%		
		>1 m s ⁻¹	ohne					
			mit	76%	63%	39%		
Minimum / Maximum Trockenwetter					45% / 81%	27% / 73%	14% / 56%	
<2 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	-278%	-25%	-		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	32%	-1%	-11%		
		>1 m s ⁻¹	ohne					
			mit	20%	-15%	-52%		
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	-	83%	68%		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	8%	35%	56%		
		>1 m s ⁻¹	ohne					
			mit	-28%	-	-		
2-10 mm h ⁻¹	≤1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	-	-13%	-		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	14%	77%	-		
		>1 m s ⁻¹	ohne					
			mit	-	-	-		
	>1m	≤10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	-	-	-		
		>10°C	≤1 m s ⁻¹	ohne				
			mit	-	-	-		
		>1 m s ⁻¹	ohne					
			mit	-	-	-		
Minimum / Maximum mit Niederschlag					-278% / 32%	-25% / 83%	-52% / 68%	
Minimum / Maximum total					Trockenwetter: 14% / 81%; mit Niederschlag: -278% / 77%			

7.7 Ammoniakemissionen des Güllelagers in Abhängigkeit der wichtigen Einflussgrössen

7.7.1 Übersicht

Wie bereits in Kap. 2.4.1 erwähnt, hängen die Emissionen stark vom Vorhandensein einer Schwimmschicht und den meteorologischen Bedingungen ab. In der Folge werden die Ursachen für die beobachtete Emissionshöhe hier noch vertieft analysiert und diskutiert. Die Diskussion fokussiert auf die folgenden Hypothesen:

1. Der Zustand der Schwimmschicht ist abhängig vom Betrieb des Güllelagers. In Perioden nach Rühren der Gülle und/oder Befüllen des Behälters sind die Emissionen erhöht.
2. Der Zustand der Schwimmschicht ist abhängig vom Füllstand des Behälters. Ein niedriger Füllstand des Behälters (weniger als 1 m) führt zu erhöhten Emissionen (vgl. Wood et al., 2012¹⁰).
3. Niederschlag (Regen) vermindert die Emissionen.
4. Die Emissionen steigen an bei zunehmenden Temperaturen.
5. Die Emissionen steigen an mit zunehmender Windgeschwindigkeit.

Die Hypothesen 1 und 2 hängen mit der Ausbildung einer Schwimmschicht zusammen. Bei Hypothese 3 spielt die erhöhte Sorption von NH_3 auf nasse Oberflächen eine Rolle, bei Hypothese 4 Turbulenz und Partialdruck von NH_3 in der flüssigen Phase und bei Hypothese 5 der gasförmige Transport von NH_3 aus dem Lagerbehälter.

Für die Analysen in Anhang 7.7.2 bis 7.7.5 wurden die Kategorien analog zu Kap. 2.4.2 gebildet, wobei die Aufteilung leicht abweichend davon entsprechend Tabelle 27 erfolgte.

Zur Bedeutung und Verwendung von Spalte „Aufteilung zur Mittelung der Emissionswerte“ und Spalte „Aggregierte Aufteilung für Darstellung und Interpretation“: vgl. Text am Ende von Kap. 2.4.2.

Tabelle 27: Aufteilung der Kategorien nach Einflussgrössen für die weiteren Analysen in Anhang 7.7.2 bis 7.7.5

Einflussgrösse	Aufteilung zur Mittelung der Emissionswerte	Aggregierte Aufteilung für Darstellung und Interpretation
a1) Zeit nach Rührereignis	0 – 24h 1 – 14d > 14d ¹¹	0 – 24h 1 – 14d > 14d ¹¹
a2) Füllstand	0.0 – 4.5 m in Gruppen von 0.5 m	≤1 m >1 m
b) Niederschlag/ Niederschlagsintensität	0 mm h ⁻¹ < 2 mm h ⁻¹ 2 – 10 mm h ⁻¹	nein (0 mm h ⁻¹) ja (> 0 mm h ⁻¹)
c) Lufttemperatur	-15 – 40 °C in Gruppen von 5 °C	≤ 0 °C >0 – 20 °C > 20 °C
d) Windgeschwindigkeit	0 – 12 m s ⁻¹ in Gruppen von 0.5 m s ⁻¹	≤ 1 m s ⁻¹ >1 – 2 m s ⁻¹ > 2 m s ⁻¹

¹⁰ Bildung Schwimmschicht erklärbar durch Verdunstung an der Oberfläche und Transport von Partikeln an die Oberfläche. Eine zunehmende Tiefe des Güllelagers fördert die Schwimmschichtbildung, da sich mit zunehmender Tiefe die Menge an Partikeln pro Flächeneinheit vergrössert.

¹¹ Vgl. dazu Kap. 3.4

Ammoniakemissionen aus einem Güllelager

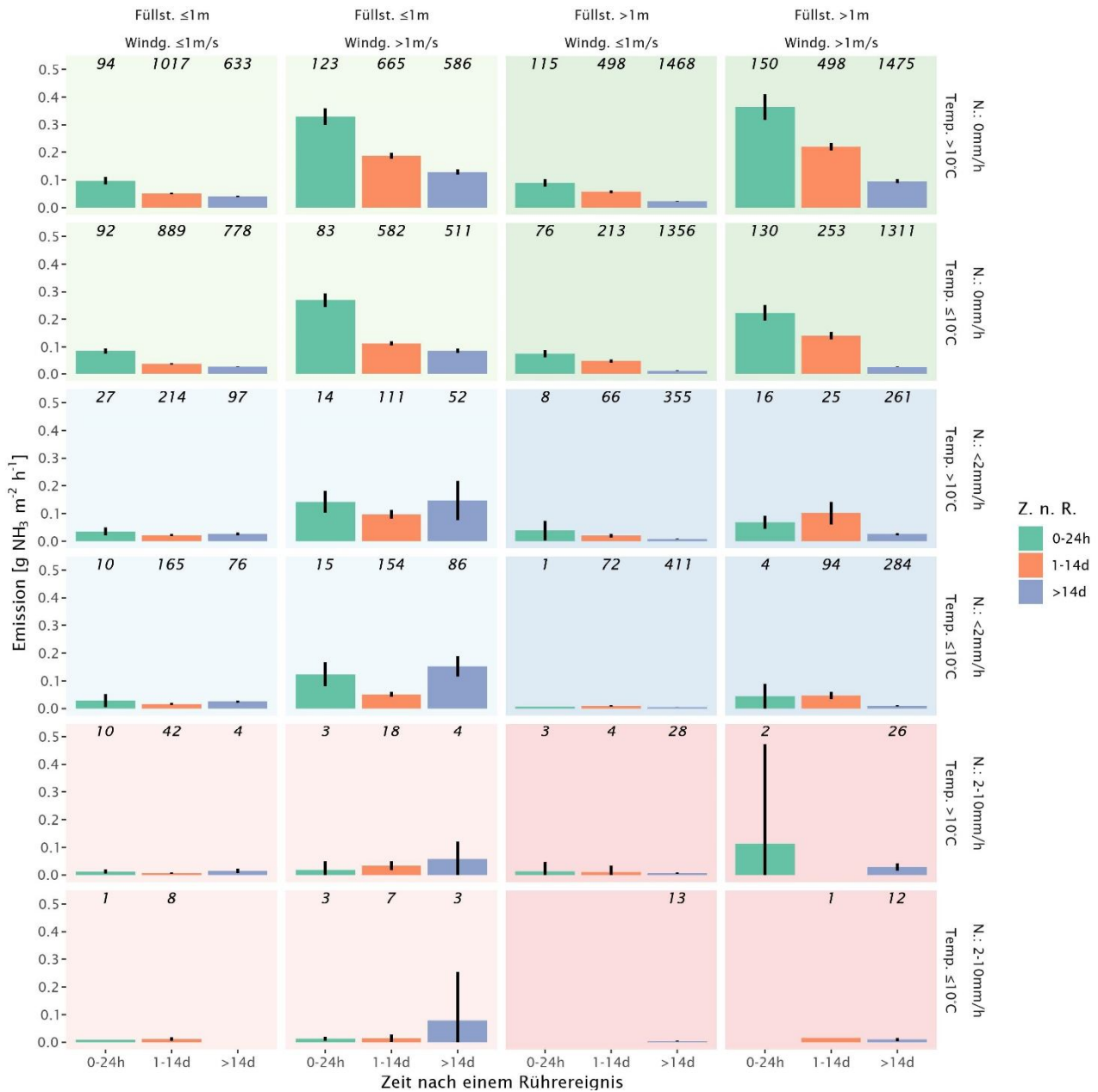


Abbildung 21: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom nicht abgedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung entsprechend der verschiedenen Einflussgrößen bzw. der Kategorien gemäss Tabelle 27. Die drei Säulen geben die Zeitdauer nach einem Rührereignis (Z.n.R.): an: 0-24h (keine Schwimmschicht vorhanden); 1-14d (Schwimmschicht schwach ausgebildet/teilweise vorhanden); >14d (gut ausgebildete Schwimmschicht vorhanden). Die horizontale Unterteilung beinhaltet den Füllstand, Füllst. ($\leq 1 \text{ m}$; $> 1 \text{ m}$) sowie die Windgeschwindigkeit, Windg. ($\leq 1 \text{ m/s}$; $> 1 \text{ m/s}$) und die vertikale Unterteilung die Niederschlagsintensität, N (0 mm h^{-1} , $< 2 \text{ mm h}^{-1}$; $2-10 \text{ mm h}^{-1}$) sowie die Temperatur, Temp. ($\leq 10^\circ\text{C}$, $> 10^\circ\text{C}$). Die Zahlen am oberen Rand oberhalb der Säulen geben die Anzahl Messintervalle (Stundenmittelwerte) an.

Diese Hypothesen werden durch Abbildung 21 und Abbildung 22 sowie die folgende Analyse weitgehend bestätigt. Die Emissionen reduzieren sich mit zunehmender Zeitdauer nach dem letzten Rührereignis, d.h. mit zunehmend ausgebildeter Schwimmschicht. Dies trifft allerdings nur bei trockenem Wetter zu. Bei Regen scheint die Sorption von NH_3 auf nasse Oberflächen über den emissionsmindernden Effekt der Schwimmschicht zu dominieren. Dies zeigt sich in Abbildung 21 und Abbildung 22 durch scheinbar eher zufällig verteilte Säulenhöhen und keine systematische Abnahme von links nach rechts, d.h. mit zunehmender Zeitdauer nach dem letzten Rührereignis, wie bei den Kategorien ohne Niederschlag. Wobei zu beachten ist, dass beim abgedeckten Lager die Abnahme der Emissionen

von links nach rechts deutlich weniger klar ausfällt infolge der deutlichen emissionsmindernden Wirkung der Abdeckung bei fehlender Schwimmschicht (vgl. Kap. 3.6.3.1, 3.6.3.2). Bei niedrigem Füllstand sind die Emissionen höher für die Perioden >14d nach einem Rührereignis. Daraus kann man schliessen, dass die Bildung einer Schwimmschicht bei niedrigem Füllstand nicht oder viel schwächer eintritt.

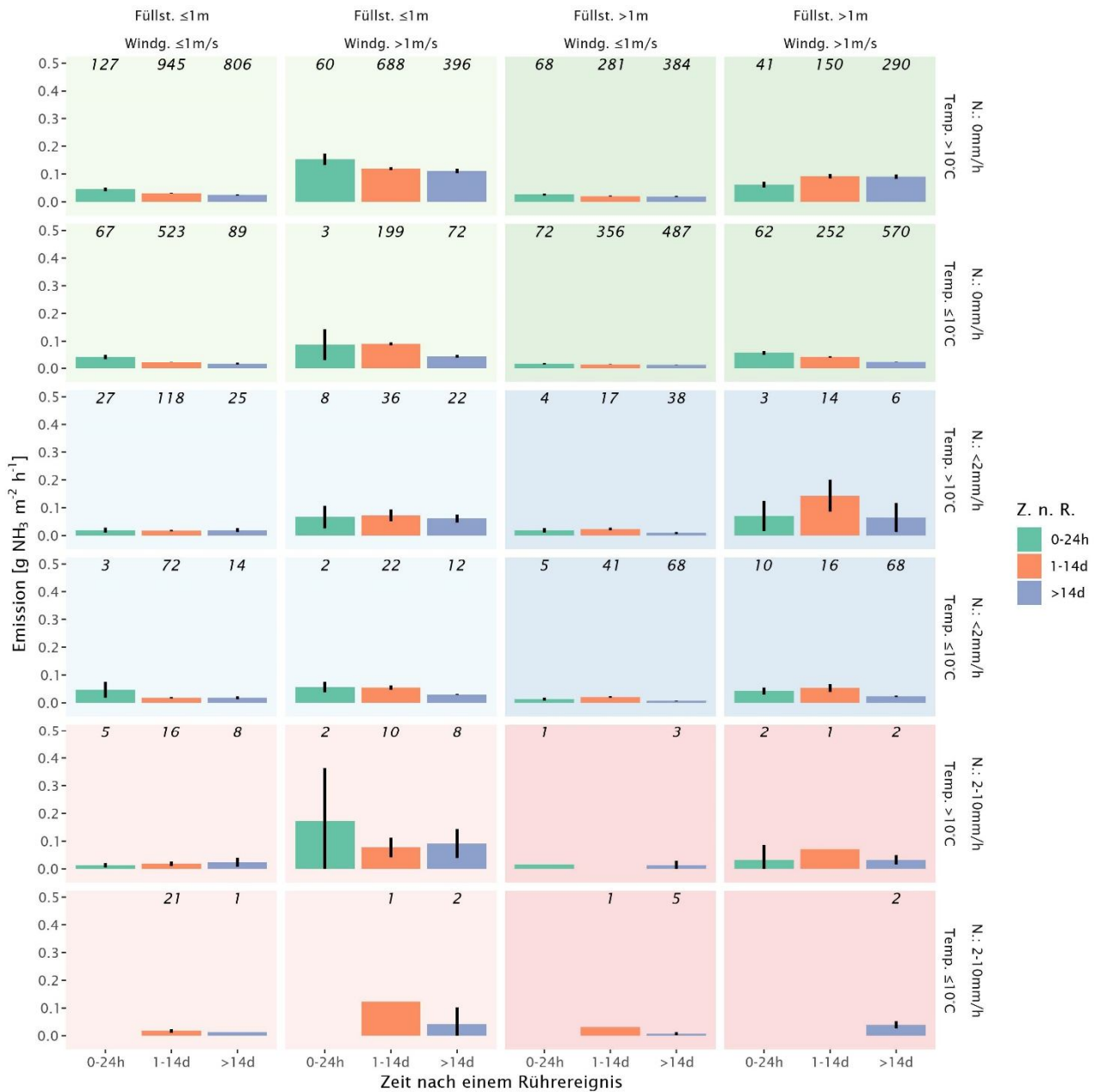


Abbildung 22: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom abgedeckten Lagerbehälter zwischen 02.05.2017 und 28.05.2018 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung entsprechend der verschiedenen Einflussgrößen bzw. der Kategorien gemäss Tabelle 27. Die drei Säulen geben die Zeitdauer nach einem Rührereignis (Z.n.R.): an: 0-24h (keine Schwimmschicht vorhanden); 1-14d (Schwimmschicht schwach ausgebildet/teilweise vorhanden); >14d (gut ausgebildete Schwimmschicht vorhanden). Die horizontale Unterteilung beinhaltet den Füllstand, Füllst. ($\leq 1 \text{ m}$; $> 1 \text{ m}$) sowie die Windgeschwindigkeit, Windg. ($\leq 1 \text{ m/s}$; $> 1 \text{ m/s}$) und die vertikale Unterteilung die Niederschlagsintensität, N (0 mm h^{-1} ; $< 2 \text{ mm h}^{-1}$; $2-10 \text{ mm h}^{-1}$) sowie die Temperatur, Temp. ($\leq 10^\circ\text{C}$, $> 10^\circ\text{C}$). Die Zahlen am oberen Rand oberhalb der Säulen geben die Anzahl Messintervalle (Stundenmittelwerte) an.

Für den Zeitraum weniger als 14 Tage nach einem Rührereignis, also bei einer wenig ausgebildeten Schwimmschicht, hat der Füllstand einen geringen Einfluss auf die Emissionen

beim ungedeckten Lagerbehälter. Beim gedeckten Lager sind die Emissionen bei hohem Füllstand meist niedriger als bei niedrigem Füllstand. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Schwimmschichtbildung aufgrund des verminderten Luftaustauschs an der Gülleoberfläche rascher einsetzt. Weiter zeigt sich, dass bei einer höheren Temperatur ($>10^{\circ}\text{C}$) die Emissionen in den meisten Fällen höher liegen und zwar weitgehend unabhängig von der Zeitdauer nach dem Rühren und dem Füllstand sowie von Auftreten oder Höhe von Niederschlag und der Windgeschwindigkeit bzw. ohne/mit Abdeckung im Vergleich zu einem analogen Zustand bei einer niedrigen Temperatur ($\leq 10^{\circ}\text{C}$).

Das Resultat der Regressionsanalyse für den ungedeckten Behälter bestätigt die fünf oben aufgeführten Hypothesen ebenfalls weitgehend und zeigt zudem ein differenzierteres Bild. Tabelle 28 gibt eine Übersicht zu den berechneten Effektgrößen. Der Effekt aufgrund der Zeit nach einem Rührereignis zeigt sich deutlich. Die Emission während und direkt nach einem Rührereignis (0-24h) ist klar höher als in den darauffolgenden 14 Tagen (1-14d, Reduktion der Emission um 64%) und zu einem späteren Zeitpunkt bei ausgebildeter Schwimmschicht ($>14\text{d}$, Reduktion der Emission um 76%). Die Höhe des Füllstandes zeigt vor allem für die Zeit von mehr als 14 Tagen nach einem Rührereignis ($>14\text{d}$) einen deutlichen Effekt, wobei ein erhöhter Füllstand (Fst $>1\text{ m}$) die Bildung einer Schwimmschicht begünstigt, was mit einer Reduktion der Emission um 73% einhergeht.

Tabelle 28: Übersicht zu den berechneten Effektgrößen (Koeffizienten: Koeff.) inklusive der relativen Effektgrößen (rel. Eff.) anhand der Regressionsanalyse vom ungedeckten Lagerbehälter. Die Koeffizienten sind aufgeteilt nach der Zeit nach einem Rührereignis (Z.n.R.) sowie dem Zustand der übrigen Einflussgrößen (Kovariate). Die Kovariate 'Basis' ist durch den folgenden Zustand definiert: Fst $\leq 1\text{ m}$, N = 0 mm/h, $T_{4.5\text{m}} = 0^{\circ}\text{C}$ und $U_{10\text{m}} = 1\text{ m/s}$. Fst: Füllstand; N: Niederschlagsintensität; $T_{4.5\text{m}}$: Lufttemperatur auf 4.5 m (Silorand); $U_{10\text{m}}$: Windgeschwindigkeit auf 10 m. SE: Standardfehler der Effektgrösse. t, P: Teststatistik und p-Wert des zweiseitigen t-Tests. Sig.: signifikante Resultate des t-Tests (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) sind mit * gekennzeichnet.

Z.n.R.	Kovariate	Koeff.	Rel. Eff.	SE (Koeff.)	t	P	Sig.
0-24h	Basis	-0.97		0.03	-29.3	0.000	*
1-14d	Basis	-0.45	-0.64	0.04	-12.7	0.000	*
>14d	Basis	-0.61	-0.76	0.03	-17.7	0.000	*
0-24h	Fst $> 1\text{m}$	-0.13	-0.25	0.03	-4.3	0.000	*
1-14d	Fst $> 1\text{m}$	-0.06	-0.13	0.04	-1.3	0.187	
>14d	Fst $> 1\text{m}$	-0.57	-0.73	0.04	-13.1	0.000	*
0-24h	N $< 2\text{ mm/h}$	-0.57	-0.73	0.05	-11.5	0.000	*
1-14d	N $< 2\text{ mm/h}$	-0.52	-0.70	0.07	-7.3	0.000	*
>14d	N $< 2\text{ mm/h}$	-0.41	-0.61	0.07	-5.7	0.000	*
0-24h	N = 2-10 mm/h	-0.91	-0.88	0.10	-9.2	0.000	*
1-14d	N = 2-10 mm/h	-0.94	-0.89	0.15	-6.3	0.000	*
>14d	N = 2-10 mm/h	-0.39	-0.59	0.15	-2.6	0.010	*
0-24h	$T_{4.5\text{m}}$	0.008	0.02	0.002	4.2	0.000	*
1-14d	$T_{4.5\text{m}}$	0.019	0.05	0.003	6.5	0.000	*
>14d	$T_{4.5\text{m}}$	0.025	0.06	0.003	8.7	0.000	*
0-24h	$\log_{10}(U_{10\text{m}})$	0.99	0.10	0.04	23.0	0.000	*
1-14d	$\log_{10}(U_{10\text{m}})$	0.95	0.09	0.06	15.1	0.000	*
>14d	$\log_{10}(U_{10\text{m}})$	0.87	0.09	0.06	14.0	0.000	*

Niederschlag reduziert die Emission um 59 – 89%, wobei eine stärkere Reduktion bei höherer Niederschlagsintensität ($N = 2-10 \text{ mm/h}$) eintritt. Zudem scheint die Reduktion aufgrund von Niederschlag bei Vorhandensein einer Schwimmschicht ($>14\text{d}$) etwas abgeschwächt zu sein. Die Emissionen nehmen mit ansteigender Lufttemperatur ($T_{4.5\text{m}}$) zu. Die niedrigste Effektgrösse tritt während und direkt nach einem Rührereignis (0-24h) ein und beträgt +2.0% pro 1°C Temperaturzunahme. 1-14d nach einem Rührereignis beträgt die Effektgrösse +4.5% pro 1°C und nach $>14\text{d}$ +6.0% pro 1°C . Für einen Temperaturunterschied von 20°C resultiert somit eine Änderung der Emission um einen Faktor von 1.3 (0-24h), 1.8 (1-14d) respektive 2.4 ($>14\text{d}$) oder entsprechend ein relativer Effekt von $\pm 30\%$, $\pm 181\%$ und $\pm 137\%$. Der Effekt der Windgeschwindigkeit ($\log_{10}(U_{10\text{m}})$) kann aufgrund des Logarithmus nicht direkt in einen relativen Effekt umgerechnet werden. Der relative Effekt der Windgeschwindigkeit auf die NH_3 Emission ist proportional zur relativen Änderung der Windgeschwindigkeit und nimmt somit mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab (+9 bis +10% pro 10% Änderung der Windgeschwindigkeit). Liegt der relative Effekt bei einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s auf 1 m/s bei +83% – +98%, so sinkt er auf +42% – +49% bei einer Erhöhung von 1 m/s auf 1.5 m/s und auf +28% – +33% bei einer Erhöhung von 1.5 m/s auf 2 m/s. Der Effekt der Windgeschwindigkeit ist bei ausgebildeter Schwimmschicht ($>14\text{d}$) kleiner als in den ersten 14 Tagen nach einem Rührereignis.

7.7.2 Einfluss der Schwimmschicht auf die Emissionen des Güllelagers

7.7.2.1 Emissionen vom Güllelager mit und ohne Schwimmschicht

Wie Kap. 3.4 gezeigt hat, lässt sich das Vorhandensein einer Schwimmschicht mit dem zeitlichen Abstand zum letzten vormaligen Rühren festlegen. Die Ammoniakemissionen sämtlicher verfügbaren Messintervalle mit Schwimmschicht vom ungedeckten Lagerbehälter (d.h. mehr als 14 Tage nach dem letzten Rühren) liegen im Mittel bei $0.04 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und ohne Schwimmschicht bei $0.11 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Der Effekt der Schwimmschicht ist deutlich sichtbar (Abbildung 23, Tabelle 29).

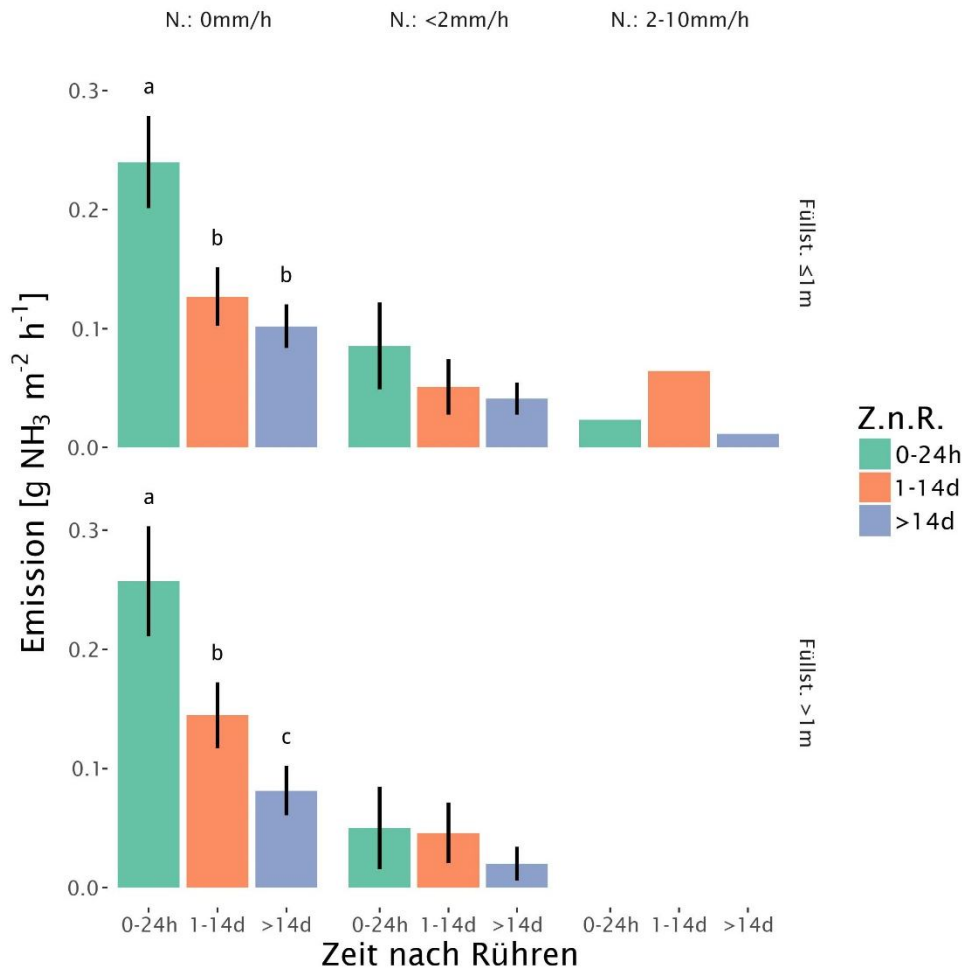


Abbildung 23: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung entsprechend der Zeitdauer nach dem Rühren (Z.n.R.) basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien: N: Niederschlag, Füllst.: Füllstand der Gülle im Lagerbehälter. Statistisch signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) innerhalb einer Kategorien-gruppe sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Die Unterschiede sind bei einem Füllstand $\leq 1 \text{ m}$ nur zwischen den Kategorien 0-24h und 1-14d nach dem letzten Rührereignis statistisch signifikant. Bei einem Füllstand von $> 1 \text{ m}$ treten statistisch signifikante Differenzen für alle Kategorien der Zeitdauer nach dem Rühren auf.

Bei leichtem Regen besteht auch eine Tendenz in Richtung niedrigere Emission bei zunehmendem zeitlichen Abstand zum letzten Rühren. Die Unterschiede sind aber statistisch nicht signifikant. Bei starkem Niederschlag ($2-10 \text{ mm h}^{-1}$) ist ein entsprechender Trend nicht erkennbar, da Niederschlag die TAN-Konzentration an der Gülleoberfläche verdünnt. Dadurch verbleibt mehr gasförmiges NH_3 in der Lösung und vermindert den Transfer von Ammoniak in die Gasphase. Zudem sorbiert NH_3 auf nasse Oberflächen.

Tabelle 29: Ammoniakemissionen (NH_3 Em.) in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 entsprechend der Zeitdauer nach dem Rühren (Z.n.R.) basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. Nied.: Niederschlagsintensität in mm h^{-1} . Fst.: Füllstand. Z.n.R. Zeit nach einem Rühreignis. NH_3 Em.: mittlere NH_3 Emission. SE: Standardfehler der mittleren NH_3 Emission. Sig.: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede innerhalb einer Kategoriengruppe. M.-int.: Anzahl Stundenintervalle. Kat.: Anzahl verschiedener Kategorien, welche für die Mittelung verwendet wurden. Fst.: Füllstand in m. Nied.: Niederschlagsintensität in mm h^{-1} , T.: Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$ (Messung auf 4.5 m). W.: Windgeschwindigkeit in m s^{-1} (Messung auf 10 m). RH: relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (Messung auf 4.5 m). Bef.: Anzahl Befüllungen, Entl.: Anzahl Entleerungen

Nied.	Fst.	Z.n.R.	NH_3 Em.	SE	Sig.	M.-int.	Kat.	Fst.	Nied.	T.	W.	RH	Bef.	Entl.
mm h^{-1}			$\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$			n	n	m	mm h^{-1}	$^\circ\text{C}$	m s^{-1}	%	n	n
0	≤1m	0-24h	0.240	0.020	*	362	65	0.6	0.0	12.9	1.5	82	10	68
0	≤1m	1-14d	0.127	0.013	*	2667	65	0.6	0.0	12.9	1.5	81	28	0
0	≤1m	>14d	0.102	0.009	*	2172	65	0.6	0.0	12.8	1.5	81	25	0
0	>1m	0-24h	0.257	0.023	*	356	104	1.9	0.0	14.1	1.8	74	4	94
0	>1m	1-14d	0.145	0.014	*	1257	104	2.0	0.0	14.3	1.8	76	14	1
0	>1m	>14d	0.081	0.011	*	3190	104	1.9	0.0	14.0	1.8	76	38	0
< 2	≤1m	0-24h	0.085	0.018		58	17	0.7	0.5	10.8	1.3	98	1	4
< 2	≤1m	1-14d	0.051	0.012		194	17	0.7	0.5	10.3	1.3	95	3	1
< 2	≤1m	>14d	0.041	0.007		143	17	0.7	0.5	10.6	1.3	99	4	0
< 2	>1m	0-24h	0.050	0.015		18	9	1.5	0.7	17.1	0.9	98	0	7
< 2	>1m	1-14d	0.046	0.012		42	9	1.5	0.7	16.1	0.9	97	0	0
< 2	>1m	>14d	0.020	0.007		118	9	1.5	0.5	16.7	0.9	100	1	0
2 – 10	≤1m	0-24h	0.023	-		2	1	0.9	2.8	16.3	1.1	100	0	0
2 – 10	≤1m	1-14d	0.064	-		1	1	0.7	2.4	15.2	1.3	94	0	0
2 – 10	≤1m	>14d	0.012	-		1	1	0.8	2.2	16.8	1.0	99	0	0

Der Einfluss einer Schwimmschicht auf die Emissionen stimmt mit Daten aus der Literatur überein. Grant und Boehm (2015) geben eine Emissionsreduktion von zwei Erdbecken (Messung unter Umweltbedingungen) von 49% bzw. 5% an. Werte einer Studie (Pilotmassstab) von Misselbrook et al. (2005) liegen bei rund 50% und von Smith et al. (2007) (Studien im Pilotmassstab und unter Umweltbedingungen) bei 60%.

Die Zeit mit Vorhandensein einer Schwimmschicht betrug 59% der gesamten Messperiode 30.01.2015-18.04.2017 (vgl. Kap. 3.6). Mit einer mittleren Emission von $0.04 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ resultierte ein Anteil von 38% der Gesamtemissionen bei Vorhandensein einer Schwimmschicht. Obwohl die Zeit ohne Schwimmschicht nur 41% des Jahres umfasst, wurden währenddessen 62% der gesamten Jahresemission produziert.

Die visuelle Auswertung der Webcam-Bilder zeigte auch eine grosse Heterogenität der Schwimmschicht. Dies untermauert die Notwendigkeit, die ganze Gülleoberfläche bei Messungen erfassen zu können. Mit Kammersystemen, welche in vielen der bisherigen Studien unter Umweltbedingungen eingesetzt wurden, ist dies praktisch nicht möglich.

7.7.2.2 Emissionen vom Güllelager bei unterschiedlichem Füllstand

Eine zunehmende Tiefe der Gülle im Lagerbehälter fördert die Schwimmschichtbildung. Dies kommt daher, dass sich die Menge an Partikeln pro Flächeneinheit mit zunehmendem Füllstand vergrößert (Wood et al., 2012). Die Ammoniakemissionen vom ungedeckten Güllelager bei einem Füllstand von >1 m liegen innerhalb der ersten 24h und den ersten 14 Tagen nach einem Rührereignis in einem ähnlichen Bereich oder sind leicht niedriger als die Emissionen bei einem Füllstand von ≤ 1 m (Abbildung 24). Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Schwimmschicht unabhängig vom Füllstand zerstört ist. Für die Zeit von mehr als 14 Tagen nach einem Rührereignis (>14 d) treten die Unterschiede in den Emissionen viel klarer hervor. In Situationen ohne Niederschlag und mit leichtem Niederschlag sind die Unterschiede statistisch signifikant.

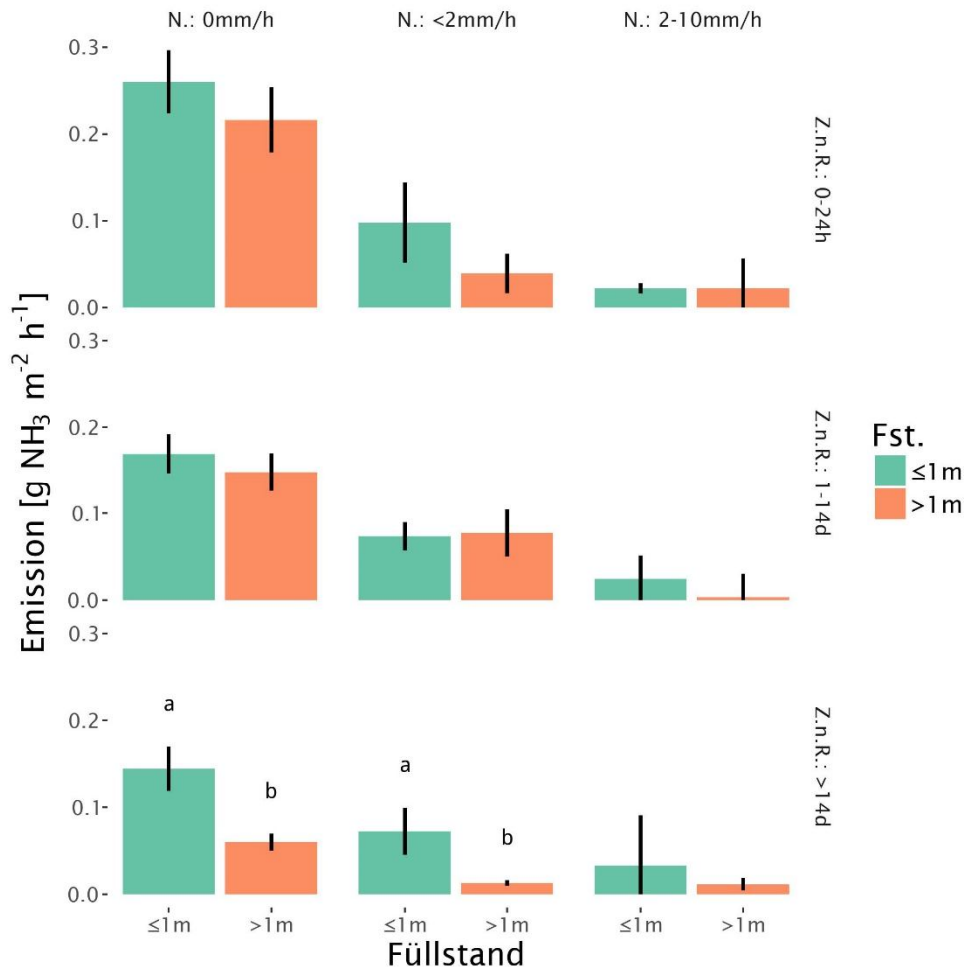


Abbildung 24: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung entsprechend Füllstand basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien: N: Niederschlag, Z.n.R.: Zeitdauer nach dem Rühren. Statistisch signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) innerhalb einer Kategoriengruppe sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

In vier von sechs Fällen sind die Emissionen bei hohem Füllstand auch bei Vorliegen von Niederschlag tiefer. Die Differenzen sind allerdings nur in einem Fall statistisch signifikant. Die in Tabelle 28 aufgeführte Datenanalyse stützt die Hypothese, wonach der Füllstand des Lagerbehälters die Emissionshöhe beeinflusst und bestätigt das Resultat der Regressionsanalyse zu den verschiedenen Effektgrößen des Füllstands (Tabelle 29).

Tabelle 30: Ammoniakemissionen (NH_3 Em.) in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 entsprechend der Füllhöhe von $\leq 1 \text{ m}$ bzw. $>1 \text{ m}$ basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. Z.n.R.: Zeitdauer nach dem Rühren. Nied.: Niederschlagsintensität. Fst.: Füllstand. NH_3 Em.: mittlere NH_3 Emission. SE: Standardfehler der mittleren NH_3 Emission. Sig.: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede innerhalb einer Kategoriengruppe. M.-int.: Anzahl Stundenintervalle. Kat.: Anzahl verschiedener Kategorien, welche für die Mittelung verwendet wurden. Fst.: Füllstand in m. Nied.: Niederschlagsintensität in mm h^{-1} , T.: Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$ (Messung auf 4.5 m). W.: Windgeschwindigkeit in m s^{-1} (Messung auf 10 m). RH: relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (Messung auf 4.5 m). Bef.: Anzahl Befüllungen, Entl.: Anzahl Entleerungen

Z.n.R.	Nied.	Fst.	NH_3 Em.	SE	Sig.	M.-int.	Kat.	Fst.	Nied.	T.	W.	RH	Bef.	Entl.
			$\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$			n	n	m	mm h^{-1}	$^\circ\text{C}$	m s^{-1}	%	n	n
0-24h	0mm/h	$\leq 1\text{m}$	0.260	0.019		383	75	0.6	0.0	14.5	1.8	78	8	71
0-24h	0mm/h	$>1\text{m}$	0.216	0.019		420	145	2.1	0.0	13.7	1.7	75	4	113
0-24h	$<2\text{mm/h}$	$\leq 1\text{m}$	0.098	0.022		34	10	0.6	0.4	12.8	1.2	99	0	5
0-24h	$<2\text{mm/h}$	$>1\text{m}$	0.039	0.010		15	7	1.9	0.5	14.0	1.5	99	0	5
0-24h	2-10mm/h	$\leq 1\text{m}$	0.022	0.001		4	2	0.9	2.9	16.4	1.0	100	0	1
0-24h	2-10mm/h	$>1\text{m}$	0.022	0.008		4	2	1.3	2.8	18.2	1.0	100	0	2
1-14d	0mm/h	$\leq 1\text{m}$	0.169	0.011		2848	109	0.5	0.0	14.8	2.2	75	26	0
1-14d	0mm/h	$>1\text{m}$	0.148	0.011		1434	154	2.0	0.0	15.3	2.0	74	14	2
1-14d	$<2\text{mm/h}$	$\leq 1\text{m}$	0.074	0.008		506	57	0.5	0.5	10.6	2.1	95	4	3
1-14d	$<2\text{mm/h}$	$>1\text{m}$	0.078	0.014		234	56	2.1	0.4	9.9	2.1	99	8	1
1-14d	2-10mm/h	$\leq 1\text{m}$	0.025	0.012		12	3	0.7	2.9	16.2	0.6	99	0	0
1-14d	2-10mm/h	$>1\text{m}$	0.003	0.002		3	2	1.6	3.6	17.0	0.7	95	0	0
$>14\text{d}$	0mm/h	$\leq 1\text{m}$	0.144	0.013	*	2496	130	0.6	0.0	11.8	2.5	78	33	0
$>14\text{d}$	0mm/h	$>1\text{m}$	0.060	0.005	*	5790	379	2.5	0.0	12.1	2.3	76	74	0
$>14\text{d}$	$<2\text{mm/h}$	$\leq 1\text{m}$	0.073	0.014	*	264	56	0.7	0.5	8.2	2.2	95	4	0
$>14\text{d}$	$<2\text{mm/h}$	$>1\text{m}$	0.013	0.002	*	1158	154	2.4	0.5	9.2	1.9	98	22	0
$>14\text{d}$	2-10mm/h	$\leq 1\text{m}$	0.033	0.013		10	8	0.7	2.9	12.4	1.2	100	0	0
$>14\text{d}$	2-10mm/h	$>1\text{m}$	0.012	0.003		27	20	2.1	3.1	14.7	1.0	100	0	0

7.7.3 Niederschlag

Abbildung 25 und Tabelle 31 zeigen die Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter in Abhängigkeit von Niederschlag. Über sämtliche Messintervalle gemittelt betragen die Emissionen bei Niederschlag $0.03 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und ohne Niederschlag $0.08 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Ein ähnliches Verhältnis ergab sich bei einem Füllstand von $>1 \text{ m}$ bzw. $\leq 1 \text{ m}$ und ohne Rühren sowie Einfüllen des Behälters. Regen bewirkte eine Verminderung der Emissionen sowohl in Perioden mit Schwimmschicht als auch in Zeiten ohne Schwimmschicht. Bei niedrigen Temperaturen führte Niederschlag zu einer geringeren Reduktion der Emissionen. Dies liess sich anhand des Intervalls 21.12.2016 bis 04.01.2017 bei Temperaturen zwischen 1 und 2°C . zeigen (Daten nicht dargestellt).

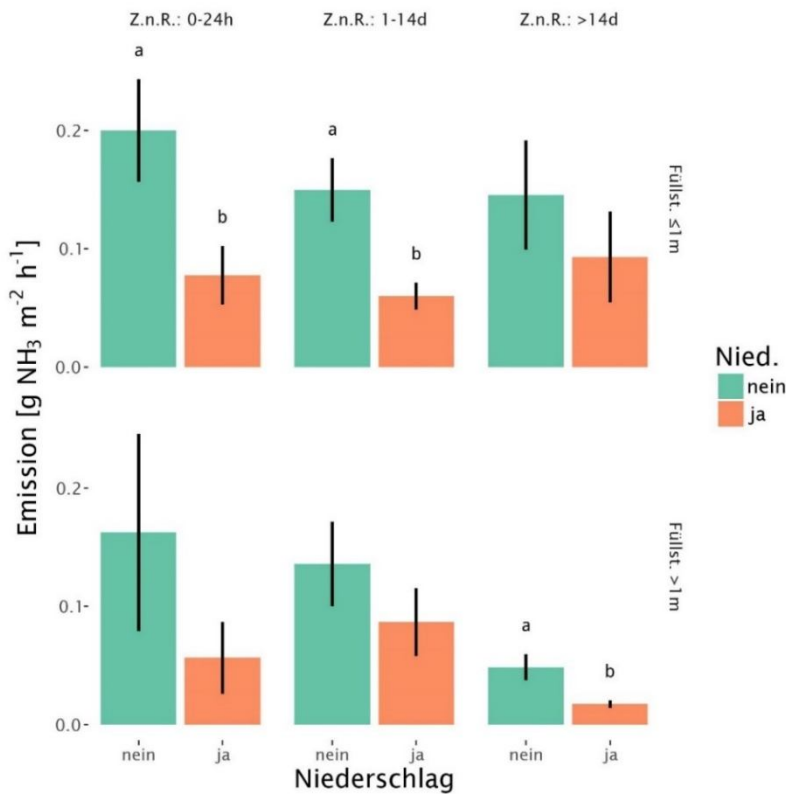


Abbildung 25: Ammoniakemissionen in g NH₃ m⁻² h⁻¹ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung mit und ohne Niederschlag basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien: Füllst.: Füllstand der Gülle im Lagerbehälter; Z.n.R.: Zeitdauer nach dem Rühren. Statistisch signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) innerhalb einer Kategoriengruppe sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Tabelle 31: Ammoniakemissionen (NH₃ Em.) in g NH₃ m⁻² h⁻¹ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 entsprechend der Aufteilung mit und ohne Niederschlag (Nied. ja/nein) basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. Nied.: Niederschlagsintensität. Fst.: Füllstand. Z.n.R. Zeit nach einem Rühreignis. NH₃ Em.: mittlere NH₃ Emission. SE: Standardfehler der mittleren NH₃ Emission. Sig.: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede innerhalb einer Kategoriengruppe. M.-int.: Anzahl Stundenintervalle. Kat.: Anzahl verschiedener Kategorien, welche für die Mittelung verwendet wurden. Fst.: Füllstand in m. Nied.: Niederschlagsintensität in mm h⁻¹, T.: Lufttemperatur in °C (Messung auf 4.5 m). W.: Windgeschwindigkeit in m s⁻¹ (Messung auf 10 m). RH: relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (Messung auf 4.5 m). Bef.: Anzahl Befüllungen, Entl.: Anzahl Entleerungen

Z.n.R.	Fst.	Nied.	NH ₃ Em.	SE	Sig.	M.-int.	Kat.	Fst.	Nied.	T.	W.	RH	Bef.	Entl.
			g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹			n	n	m	mm h ⁻¹	°C	m s ⁻¹	%	n	n
0-24h	≤1m	nein	0.200	0.022	*	207	27	0.6	0.0	12.5	1.5	83	5	36
0-24h	≤1m	ja	0.078	0.012	*	93	32	0.7	1.0	12.4	1.4	99	1	9
0-24h	>1m	nein	0.163	0.041		57	13	1.6	0.0	17.3	1.3	78	0	12
0-24h	>1m	ja	0.057	0.014		28	15	1.6	1.1	17.6	1.2	98	0	10
1-14d	≤1m	nein	0.150	0.014	*	2538	73	0.5	0.0	10.6	2.2	82	22	0
1-14d	≤1m	ja	0.060	0.006	*	655	98	0.5	1.2	10.6	2.1	96	4	1
1-14d	>1m	nein	0.136	0.018		909	54	2.0	0.0	11.0	1.9	81	9	0
1-14d	>1m	ja	0.087	0.015		239	57	2.0	0.6	10.8	1.8	97	8	1
>14d	≤1m	nein	0.145	0.024		2091	60	0.6	0.0	8.5	2.4	84	24	0
>14d	≤1m	ja	0.093	0.019		283	67	0.7	0.8	8.7	2.3	95	4	0
>14d	>1m	nein	0.048	0.006	*	4736	191	2.3	0.0	10.3	2.1	82	60	0
>14d	>1m	ja	0.017	0.002	*	1302	237	2.3	1.1	10.8	2.0	98	22	0

7.7.4 Temperatur

Abbildung 26 und Tabelle 32 zeigen die Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter in Abhängigkeit von der Temperatur. Über sämtliche Messintervalle gemittelt betragen die Emissionen bei hohen Temperaturen (Mittelwert = 17°C) 0.09 g NH₃ m⁻² h⁻¹. Bei niedrigen Temperaturen (Mittelwert = 4°C) wurde nur etwa halb so viel NH₃ abgegeben. Das Ausschalten von weiteren wichtigen Einflussparametern (d.h. kein Rühren sowie Einfüllen des Behälters, kein Niederschlag) bewirkte keine wesentliche Veränderung der Emissionshöhe bei hohen und niedrigen Temperaturen. Die Differenzen sind allerdings nur für die Kategorien 1 bis 14 Tage und >14 Tage nach dem letzten Rührereignis (ohne Niederschlag) bzw. >14 Tage nach dem letzten Rührereignis (mit Niederschlag) statistisch signifikant.

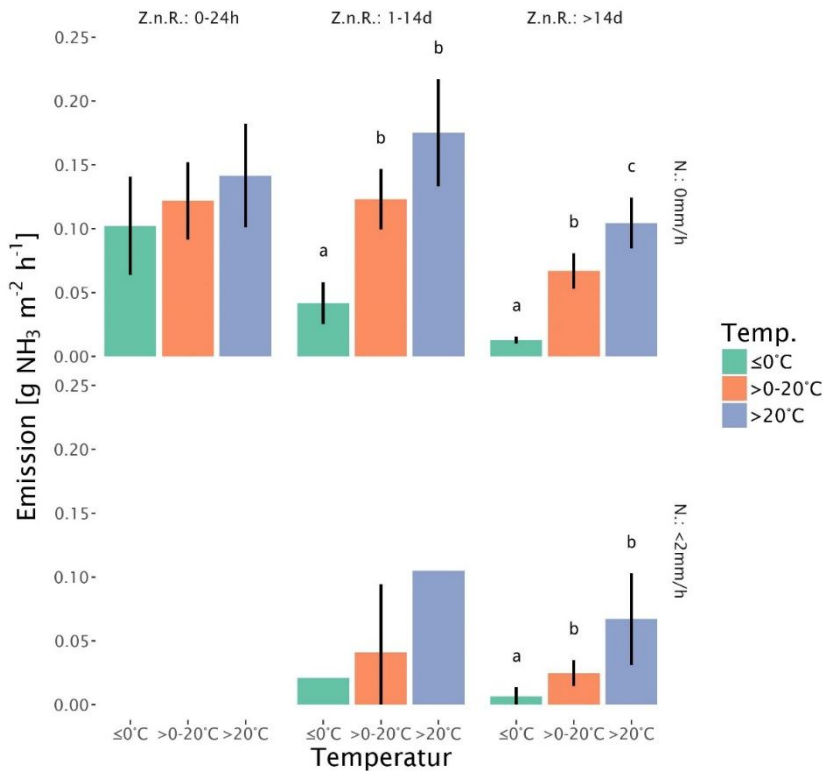


Abbildung 26: Ammoniakemissionen in g NH₃ m⁻² h⁻¹ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung für die Temperaturbereiche (Temp.) ≤0°C, >0 bis 20°C und über 20°C basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien: Z.n.R.: Zeitdauer nach dem Rühren; Statistisch signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau α = 0.05) innerhalb einer Kategoriengruppe sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Tabelle 32: Ammoniakemissionen (NH₃ Em.) in g NH₃ m⁻² h⁻¹ vom nicht abgedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 für die Temperaturbereiche ≤0°C, >0 bis 20°C und über 20°C basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. Nied.: Niederschlagsintensität. Fst.: Füllstand. Z.n.R. Zeit nach einem Rührereignis. NH₃ Em.: mittlere NH₃ Emission. SE: Standardfehler der mittleren NH₃ Emission. Sig.: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede innerhalb einer Kategoriengruppe. M.-int.: Anzahl Stundenintervalle. Kat.: Anzahl verschiedener Kategorien, welche für die Mittelung verwendet wurden. Fst.: Füllstand in m. Nied.: Niederschlagsintensität in mm h⁻¹, T.: Lufttemperatur in °C (Messung auf 4.5 m). W.: Windgeschwindigkeit in m s⁻¹ (Messung auf 10 m). RH: relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (Messung auf 4.5 m). Bef.: Anzahl Befüllungen, Entl.: Anzahl Entleerungen

Z.n.R.	Nied.	T.	NH ₃ Em.	SE	Sig.	M.-int.	Kat.	Fst.	Nied.	T.	W.	RH	Bef.	Entl.
	mm h ⁻¹	°C	g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹			n	n	m	mm h ⁻¹	°C	m s ⁻¹	%	n	n
0-24h	0	≤ 0	0.102	0.018		24	8	1.0	0.0	-0.4	0.7	98	3	5
0-24h	0	>0 - 20	0.122	0.015		190	29	1.0	0.0	9.9	0.8	85	4	32
0-24h	0	>20	0.142	0.020		53	15	1.2	0.0	24.9	0.7	65	2	21
1-14d	0	≤ 0	0.042	0.008	*	322	13	0.5	0.0	-1.6	1.6	94	2	0
1-14d	0	>0 - 20	0.123	0.012	*	2330	52	0.5	0.0	10.0	1.6	85	21	0
1-14d	0	>20	0.175	0.021	*	387	31	0.5	0.0	25.6	1.6	55	5	0
1-14d	< 2	≤ 0	0.021	NA		1	1	0.8	0.1	-2.4	1.2	99	0	0
1-14d	< 2	>0 - 20	0.041	0.023		10	3	0.9	0.5	11.4	1.2	92	0	0
1-14d	< 2	>20	0.105	NA		2	1	0.8	0.4	20.3	1.2	100	0	0
>14d	0	≤ 0	0.013	0.001	*	866	70	1.7	0.0	-4.0	1.8	92	3	0
>14d	0	>0 - 20	0.067	0.007	*	5556	174	1.8	0.0	10.1	1.9	84	72	0
>14d	0	>20	0.104	0.010	*	1083	91	1.7	0.0	25.3	1.6	60	13	0
>14d	< 2	≤ 0	0.006	0.004	*	36	8	1.5	0.2	-2.6	1.4	94	0	0
>14d	< 2	>0 - 20	0.025	0.005	*	272	29	1.5	0.5	10.3	1.2	99	5	0
>14d	< 2	>20	0.067	0.016	*	19	8	1.4	0.3	21.7	1.3	98	0	0

7.7.5 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit hat einen starken Einfluss auf die Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter, wie Abbildung 27 und Tabelle 33 zeigen. Die Emissionen steigen an bei zunehmender Windgeschwindigkeit (Differenzen zwischen den Kategorien $\leq 1 \text{ m s}^{-1}$, $>1\text{-}2 \text{ m s}^{-1}$, $>2 \text{ m s}^{-1}$ statistisch signifikant ausser bei $> 2 \text{ m s}^{-1}$ Niederschlag). Die Emissionszunahme zeigt sich auch unabhängig vom Vorhandensein einer Schwimmschicht.

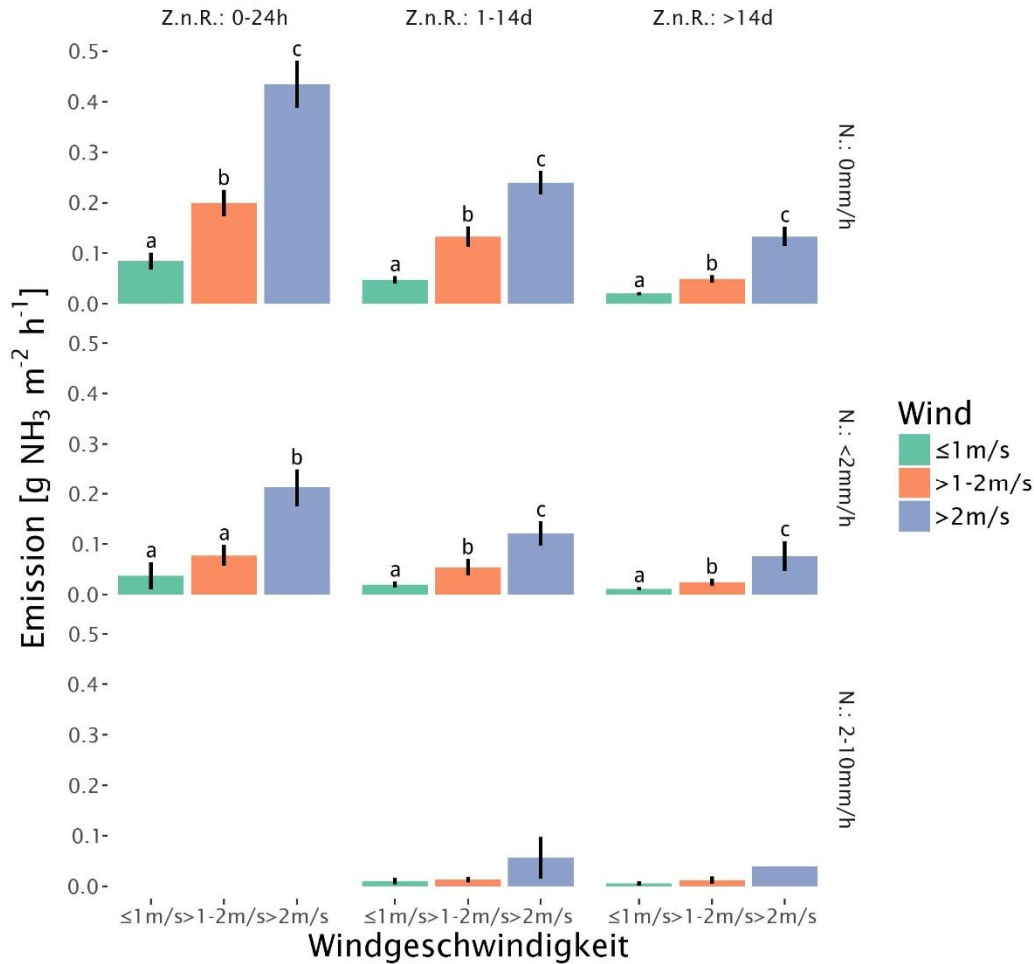


Abbildung 27: Ammoniakemissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 angegeben als Mittelwert. Die vertikale Linie zeigt den Bereich zwischen Minimum und Maximum: Darstellung für Windgeschwindigkeiten $\leq 1 \text{ m/s}$, $>1\text{-}2 \text{ m/s}$ und $>2 \text{ m/s}$ basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien; Z.n.R.: Zeitdauer nach dem Rühren; N: Niederschlag. Statistisch signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) innerhalb einer Kategoriengruppe sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Tabelle 33: Ammoniakemissionen (NH₃ Em.) in g NH₃ m⁻² h⁻¹ vom ungedeckten Lagerbehälter zwischen 30.01.2015 und 18.04.2017 für Windgeschwindigkeiten ≤1 m/s, >1-2 m/s und >2 m/s basierend auf direkt vergleichbaren Kategorien. Nied.: Niederschlagsintensität. Fst.: Füllstand. Z.n.R. Zeit nach einem Rührereignis. NH₃ Em.: mittlere NH₃ Emission. SE: Standardfehler der mittleren NH₃ Emission. Sig.: mit * gekennzeichnete Werte zeigen statistisch signifikante Unterschiede innerhalb einer Kategoriengruppe. M.-int.: Anzahl Stundenintervalle. Kat.: Anzahl verschiedener Kategorien, welche für die Mittelung verwendet wurden. Fst.: Füllstand in m. Nied.: Niederschlagsintensität in mm h⁻¹, T.: Lufttemperatur in °C (Messung auf 4.5 m). W.: Windgeschwindigkeit in m s⁻¹ (Messung auf 10 m). RH: relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (Messung auf 4.5 m). Bef.: Anzahl Befüllungen, Entl.: Anzahl Entleerungen

Z.n.R.	Nied.	W.	NH ₃ Em.	SE	Sig.	M.-int.	Kat.	Fst.	Nied.	T.	W.	RH	Bef.	Entl.
	mm h ⁻¹	m s ⁻¹	g NH ₃ m ⁻² h ⁻¹			n	n	m	mm h ⁻¹	°C	m s ⁻¹	%	n	n
0-24h	0	≤1	0.085	0.009	*	291	52	1.5	0.0	14.0	0.5	77	5	72
0-24h	0	>1 – 2	0.199	0.013	*	212	53	1.6	0.0	13.5	1.5	79	4	54
0-24h	0	>2	0.435	0.023	*	248	104	1.5	0.0	14.0	3.3	71	2	40
0-24h	< 2	≤1	0.037	0.013	*	24	7	0.6	0.6	12.8	0.6	100	0	3
0-24h	< 2	>1 – 2	0.077	0.009	*	17	7	0.6	0.4	11.2	1.4	98	0	3
0-24h	< 2	>2	0.212	0.016	*	15	8	0.8	0.2	10.5	3.3	96	1	1
1-14d	0	≤1	0.047	0.004	*	2629	68	1.4	0.0	15.2	0.5	81	30	0
1-14d	0	>1 – 2	0.133	0.011	*	1164	68	1.4	0.0	15.5	1.5	76	12	0
1-14d	0	>2	0.239	0.012	*	825	160	1.1	0.0	14.4	3.8	69	0	2
1-14d	< 2	≤1	0.020	0.003	*	461	33	1.3	0.5	10.8	0.5	99	7	0
1-14d	< 2	>1 – 2	0.054	0.008	*	175	31	1.3	0.5	11.1	1.5	98	3	0
1-14d	< 2	>2	0.121	0.012	*	176	63	1.1	0.4	9.6	3.6	93	2	4
1-14d	2 – 10	≤1	0.010	0.003		36	6	0.5	2.9	11.4	0.5	100	0	0
1-14d	2 – 10	>1 – 2	0.013	0.002		14	5	0.4	3.3	10.3	1.4	100	0	0
1-14d	2 – 10	>2	0.056	0.013		11	8	0.4	3.1	11.9	3.5	99	0	0
>14d	0	≤1	0.020	0.002	*	4252	118	2.1	0.0	12.0	0.6	82	52	0
>14d	0	>1 – 2	0.049	0.004	*	2409	119	2.1	0.0	11.7	1.5	78	25	0
>14d	0	>2	0.133	0.010	*	1599	298	2.0	0.0	11.4	3.8	72	30	0
>14d	< 2	≤1	0.011	0.002	*	811	56	1.9	0.4	9.8	0.5	100	15	0
>14d	< 2	>1 – 2	0.024	0.004	*	314	53	1.9	0.5	10.0	1.5	99	4	0
>14d	< 2	>2	0.076	0.015	*	289	116	2.0	0.5	9.3	3.8	93	2	0
>14d	2 – 10	≤1	0.006	0.002		15	9	1.4	2.9	15.9	0.6	100	0	0
>14d	2 – 10	>1 – 2	0.012	0.003		15	11	1.6	3.4	14.6	1.5	100	0	0
>14d	2 – 10	>2	0.039	0.013		9	9	1.6	3.1	13.7	3.2	100	0	0

7.7.6 Emissionen bei Befüllung von oberhalb der Gülleoberfläche und von unterhalb der Gülleoberfläche

Wie in Kap. 3.3 erwähnt erfolgte die Befüllung des Lagerbehälters vom 30. Januar 2015 bis am 16. Mai 2016 von oben auf die Gülleoberfläche und zwischen dem 17. Mai 2016 und dem 30. Januar 2017 von unten via Tauchrohr. Für diese Zeitperioden erfolgte ein Vergleich der Emissionen bei den beiden Anordnungen. Diese wurden so ausgewählt, dass die übrigen bekannten Einflussgrößen möglichst vergleichbar waren. Dazu galten die folgenden Bedingungen: kein Rühren, kein Entleeren, kein Niederschlag, Temperatur $>15^{\circ}\text{C}$, Füllstand >1 m. Zwei weitere Perioden (1. Februar 2016 - 1. April 2016 und 1. August 2016 - 1. Dezember 2016) wies bei Anpassung der Suchkriterien für die Temperatur ($>10^{\circ}\text{C}$; $<18^{\circ}\text{C}$) mit Ausnahme der Windgeschwindigkeit vergleichbare Bedingungen bei den oben aufgeführten Parametern auf.

Tabelle 34 zeigt, dass die Emissionen bei Befüllung von oben erwartungsgemäss höher lagen. Die Differenzen sind allerdings nur beim ersteren Datenpaar deutlich. Beim letzteren mit einer geringen Differenz ist jedoch die Windgeschwindigkeit bei Einfüllen unten rund doppelt so hoch. Dies lässt den Schluss zu, dass auch hier bei vergleichbarer Windgeschwindigkeit, die Emissionen bei Befüllung unten deutlich niedriger liegen müssten. Zudem war der Füllstand bei der Befüllung unten bei beiden Datenpaaren nur rund halb so hoch wie bei der Befüllung oben, was das höhere Emissionspotential bei dieser Anordnung untermauert.

Tabelle 34: Ammoniakemissionen vom Güllelager bei Befüllung des Lagerbehälters von oben und von unten. Bedingungen: kein Rühren, kein Entleeren, kein Niederschlag, Temperatur $>15^{\circ}\text{C}$ (bzw. $>10^{\circ}\text{C}$; $<18^{\circ}\text{C}$), Füllstand >1 m. Bef. Befüllen; Messint.: Anzahl Messintervalle à 10 Minuten; NH_3 Em.: Emissionen in $\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; Füllst.: Füllstand des Lagerbehälters in m; T.: Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ (Messung auf 4.5 m); RH: relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (Messung auf 4.5 m); W.: Windgeschwindigkeit in m s^{-1} (Messung auf 10 m)

Bef.	Periode	T.	Messint.	NH_3 Em.	Füllst.	T.	RH	W.
		$^{\circ}\text{C}$	n	$\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	m	$^{\circ}\text{C}$	%	m s^{-1}
oben	01.04.2016-16.05.2016	>15	37	0.057	3.0	18.9	87	0.9
unten	17.05.2016-30.06.2016	>15	33	0.016	1.8	19.3	94	1.0
oben	01.02.2016-01.04.2016	>10	27	0.021	3.2	10.8	97	1.2
unten	01.08.2016-01.12.2016	<18	21	0.017	1.4	9.6	91	2.6

7.7.7 Ereignisse mit hohen Emissionen vom ungedeckten Lagerbehälter

An sechs Tagen (12.03.2015, 31.03.2015, 07.04.2015, 08.04.2015, 31.07.2015, 23.03.2017) wurden die höchsten Emissionswerte ($>0.9 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) vom ungedeckten Lagerbehälter gemessen. Die Ursachen dafür werden nachfolgend analysiert:

- An allen Tagen lagen hohe Windgeschwindigkeiten ($>4 \text{ m s}^{-1}$) vor und war kein Niederschlag oder Niederschlag nur vor oder nach dem Höchstwert vorhanden.
- Am 12.03.2015, am 31.07.2015 und am 23.03.2017 war die Schwimmschicht teilweise oder vollständig zerstört aufgrund von Rühren während oder innerhalb der letzten 24h vor dem Spitzenwert (Abbildung 28 bis Abbildung 30). Am 23.03.2017 wurde vor dem Höchstwert von oben Gülle eingefüllt und gegen Ende der Befüllung gleichzeitig gerührt.
- Am 31.03.2015, am 07.04.2015 sowie am darauffolgenden Tag 08.04.2015 lag das letzte Rührereignis mehr als 14 Tage zurück, was auf eine gut ausgebildete Schwimmschicht hindeutet. Allerdings war diese am 31.03.2015 schwach ausgebildet (mündl. Mitteilung R. Eugster, AWEL), da der Füllstand tief lag (Abbildung 31 bis Abbildung 33)

und Regenereignisse in den Vortagen zu einer Verflüssigung der obersten Schicht geführt hatten. Am 07.04.2015 war die Schwimmschicht ebenfalls nur schwach ausgebildet. Sie befand sich ab dem 05.04.2015 erst im Aufbau. Starkniederschläge hatten zu dieser Zeit Fasern in die Gülle eingeschwemmt und so ihre Ausbildung der Schwimmschicht behindert. Sie war somit sehr weich. Beim Einfüllen am 07.04.2015 wurde die bestehende weiche Schwimmschicht auf die Seite geschoben aufgrund der Befüllung des Behälters von oben (Abbildung 34). In Kombination mit einer hohen Windgeschwindigkeit ($>4 \text{ m s}^{-1}$) führte diese Situation zu hohen Emissionen, wobei die Temperaturen maximal ca. 16°C erreichten (Abbildung 31 bis Abbildung 33).

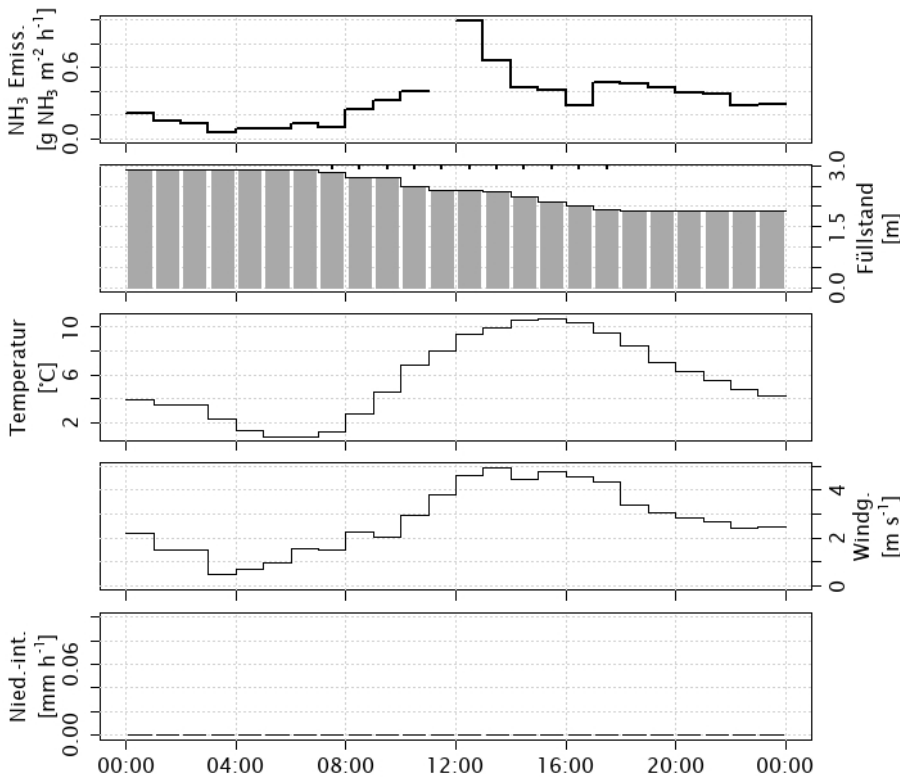


Abbildung 28: Ammoniakemissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), Füllstand (m) inkl. Rührereignisse (Striche am oberen Rand), Temperatur ($^\circ\text{C}$), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität (mm h^{-1}) vom nicht abgedeckten Lagerbehälter am 12.03.2015.

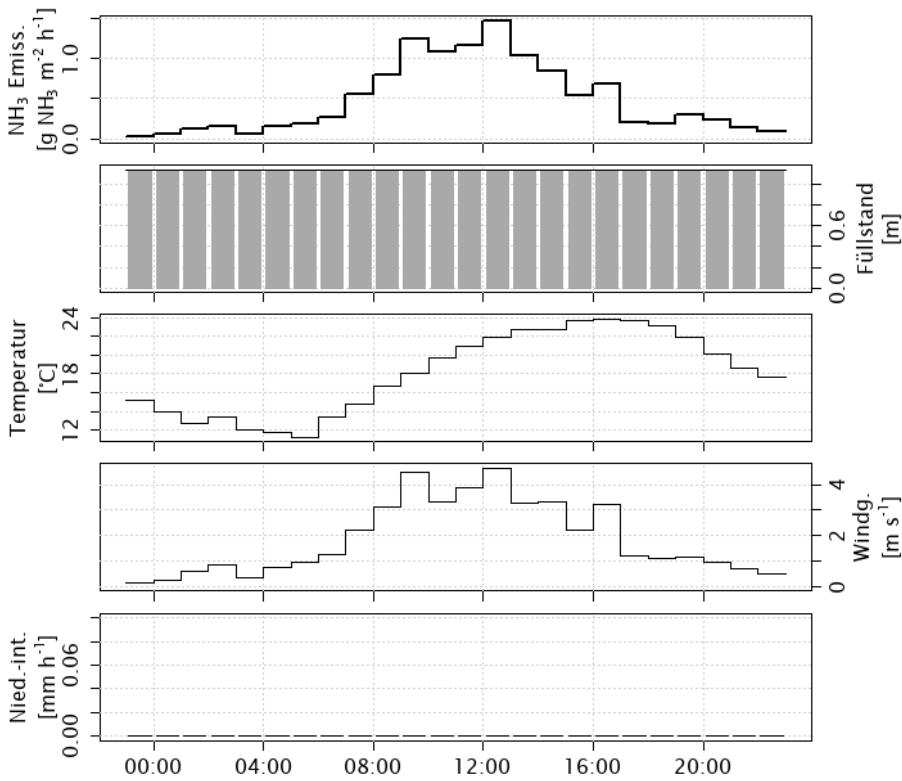


Abbildung 29: Ammoniakemissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), Füllstand (m), Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität (mm h^{-1}) vom nicht abgedeckten Lagerbehälter am 31.07.2015.

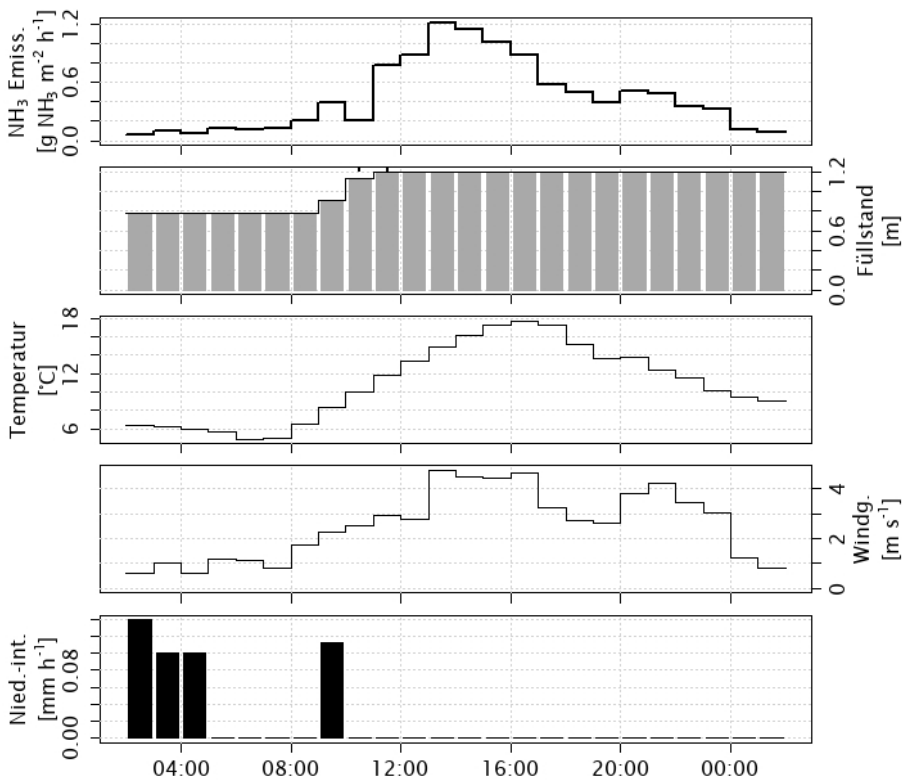


Abbildung 30: Ammoniakemissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), Füllstand (m) inkl. Rührereignisse (Striche am oberen Rand), Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität (mm h^{-1}) vom nicht abgedeckten Lagerbehälter am 23.03.2017.

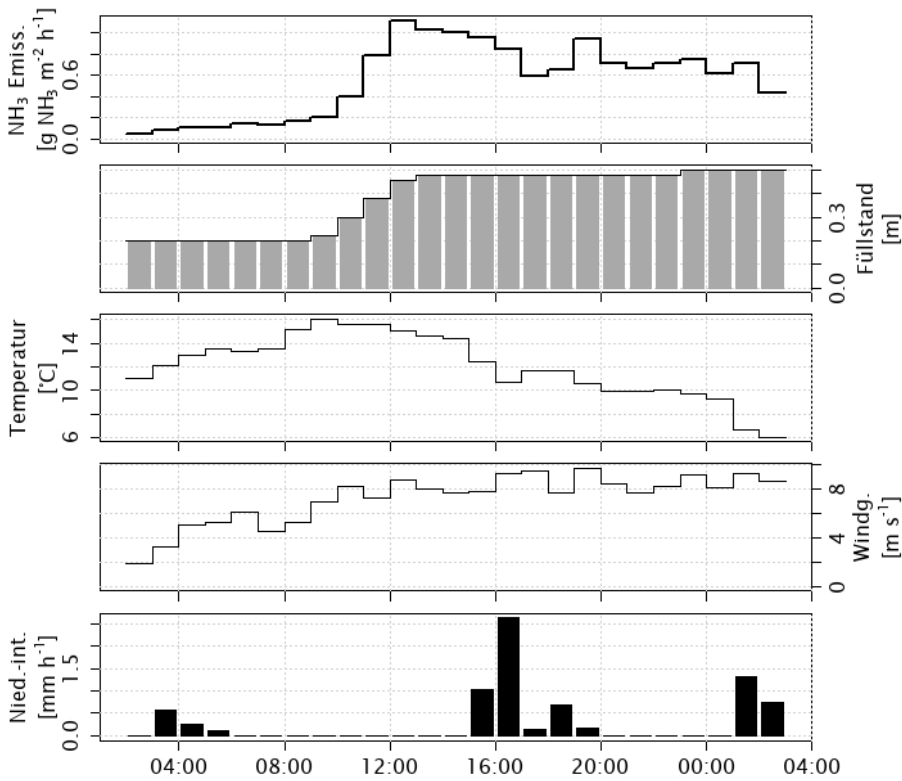


Abbildung 31: Ammoniakemissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), Füllstand (m), Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität (mm h^{-1}) vom nicht abgedeckten Lagerbehälter am 31.03.2015.

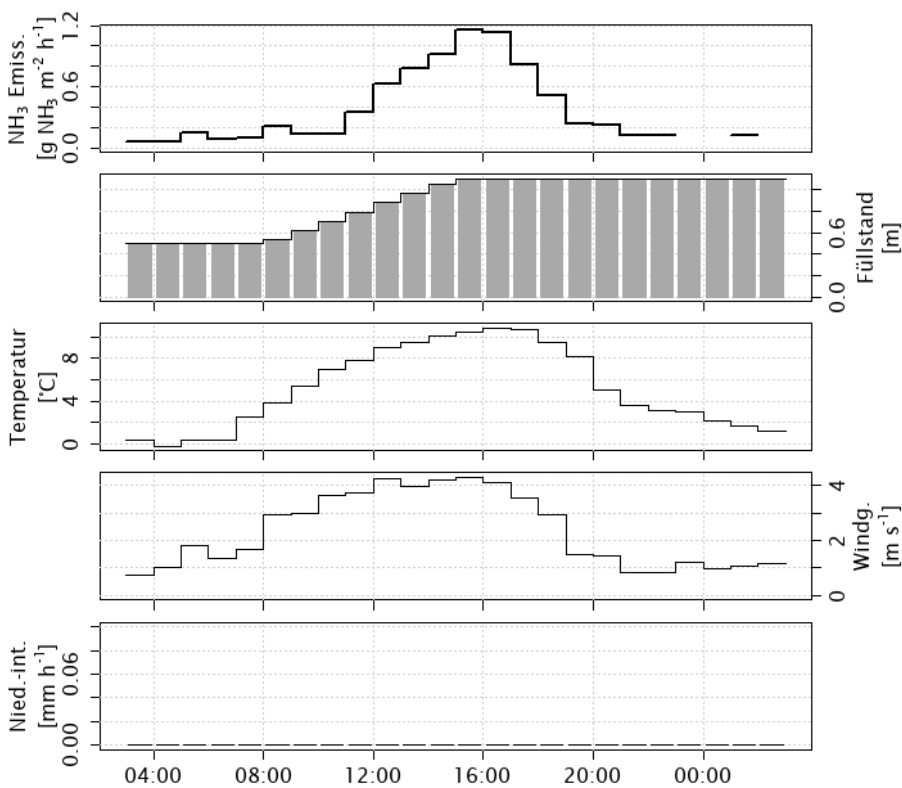


Abbildung 32: Ammoniakemissionen ($\text{g NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), Füllstand (m), Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}) und Niederschlagsintensität (mm h^{-1}) vom nicht abgedeckten Lagerbehälter am 07.04.2015.

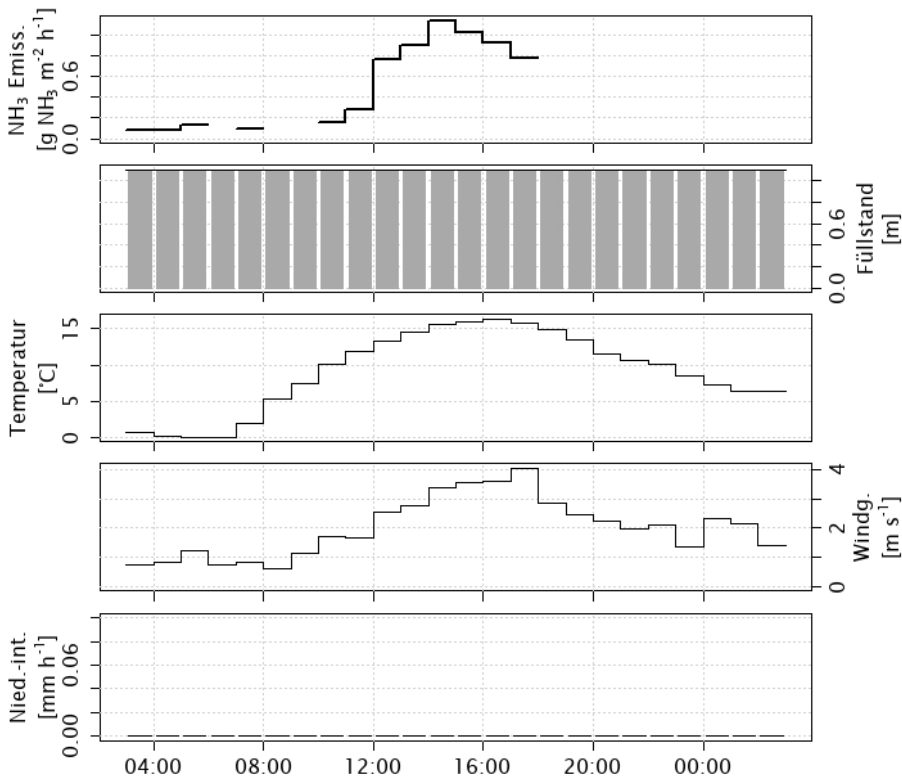


Abbildung 33: Ammoniakemissionen (g NH₃ m⁻² h⁻¹), Füllstand (m), Temperatur (°C), Windgeschwindigkeit (m s⁻¹) und Niederschlagsintensität (mm h⁻¹) vom nicht abgedeckten Lagerbehälter am 08.04.2015.



07.04.15 06h50



07.04.15 09h40



07.04.15 11h40



07.04.15 16h20



08.04.15 14h10

Abbildung 34: WebCam Bilder der Gülleoberfläche für ausgewählte Zeiten an den beiden Tagen vom 07.04.2015 und 08.04.2015.

7.8 Strömungssimulation des Luftaustausches am offenen und abgedeckten Lager unter ausgesuchten Szenarien

Die in vorliegender Untersuchung gewählten Ansätze zur Bestimmung der Emissionen und Reduktionswirkung durch die teilschwimmende Abdeckung sind empirisch. Dabei lassen sich systematische methodische Unsicherheiten nicht umfassend quantifizieren. Um die empirischen Untersuchungen durch Prozess-basierte Berechnungen zu ergänzen und somit einen weiteren Plausibilisierungs- und Erklärungsschritt zu unternehmen, wurde eine Strömungssimulation am untersuchten Lager für ausgewählte Szenarien durchgeführt. So konnte der Prozess des Luftaustausches am offenen und abgedeckten Lager isoliert betrachtet und seine Rolle für die Emissionen verstanden werden. Die 3-dimensionale Detail-Simulation wurde mittels „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) durch die Firma „AFC Air Flow Consulting“ (Zürich) im Auftrag des AWEL durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine stationäre Berechnung, die sowohl mechanische als auch thermische Prozesse abbildet, um die Strömung zu berechnen. Die Strömung und Ausbreitung der Emission am Lager wurde ohne und mit Abdeckung (Abbildung 35) für verschiedene Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeiten) in insgesamt 8 Szenarien (S1-S8) simuliert (Tabelle 35). Zudem wurde beim Lager mit Abdeckung der Füllstand variiert, so dass der Einfluss des durch die Gülleoberfläche verschlossenen oder offenen Loches analysiert werden konnte. Für sämtliche Szenarien (ausgenommen S5, Nachtfall) wurde der 30. Juli, 14:00 Uhr (warmer Sommertag), festgelegt und diente als Grundlage für die Umgebungsrandbedingungen. Der Einstrahlwinkel der Sonne ist somit definiert. Dies ist insbesondere für die einfallende Energie und die Abbildung des Schattens auf den Oberflächen wichtig. Die gewählten Randbedingungen und Szenarien wurden so ausgewählt, dass die Simulationen typische aber eher extreme Bedingungen abbilden, um die Effekte in ihrer Spannbreite aufzeigen zu können. In jedem untersuchten Szenario wurde auf der Oberfläche der Gülle ein Tracer emittiert, sodass die Verdünnung im gesamten Strömungsfeld analysiert werden konnte.

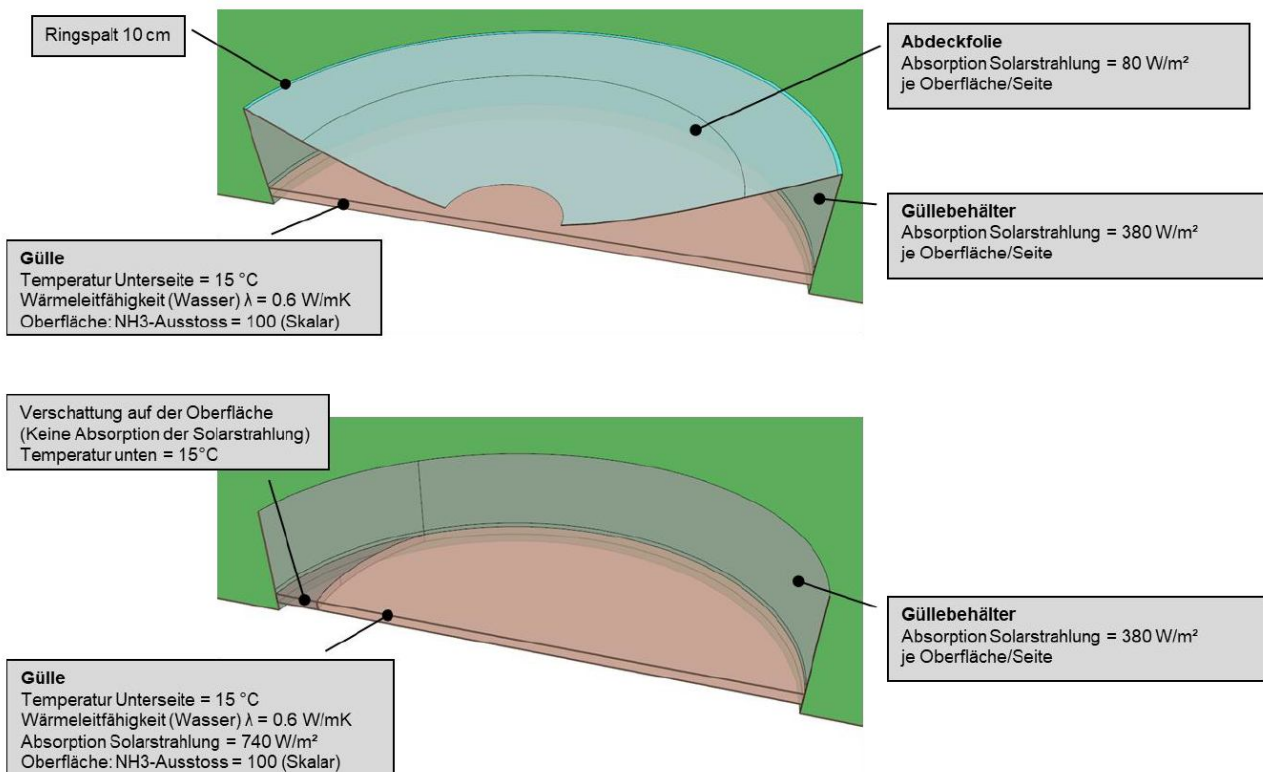


Abbildung 35: Randbedingungen des Güllelagers (3D-Modell geschnitten).

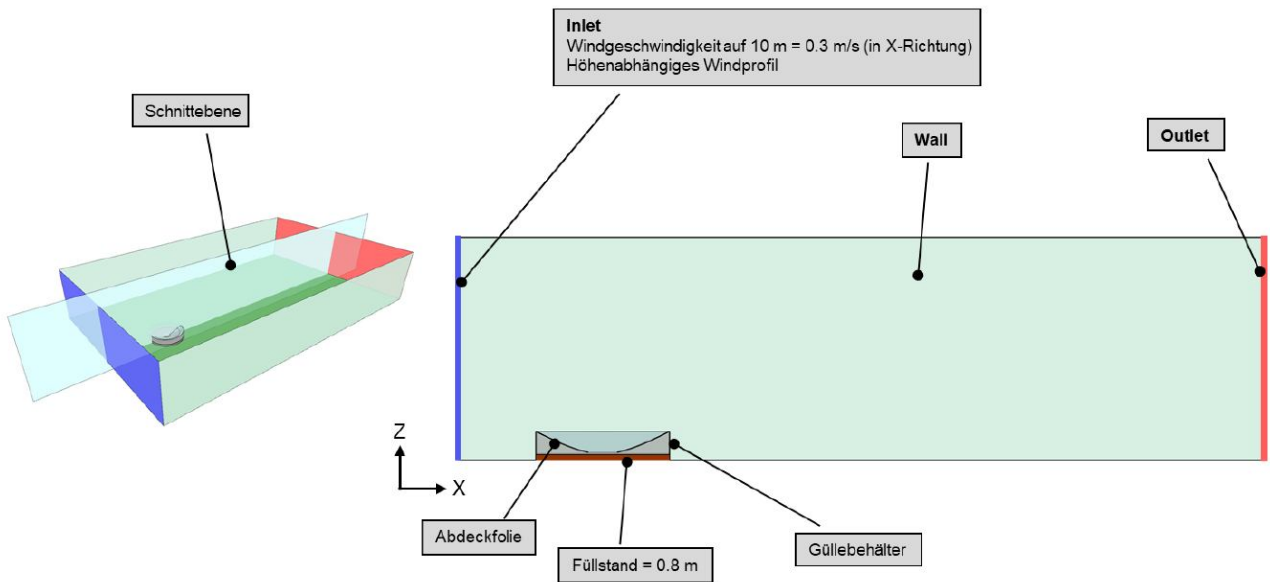


Abbildung 36: 3D-Modell mit Umgebungsrandbedingungen und Längsschnitt.

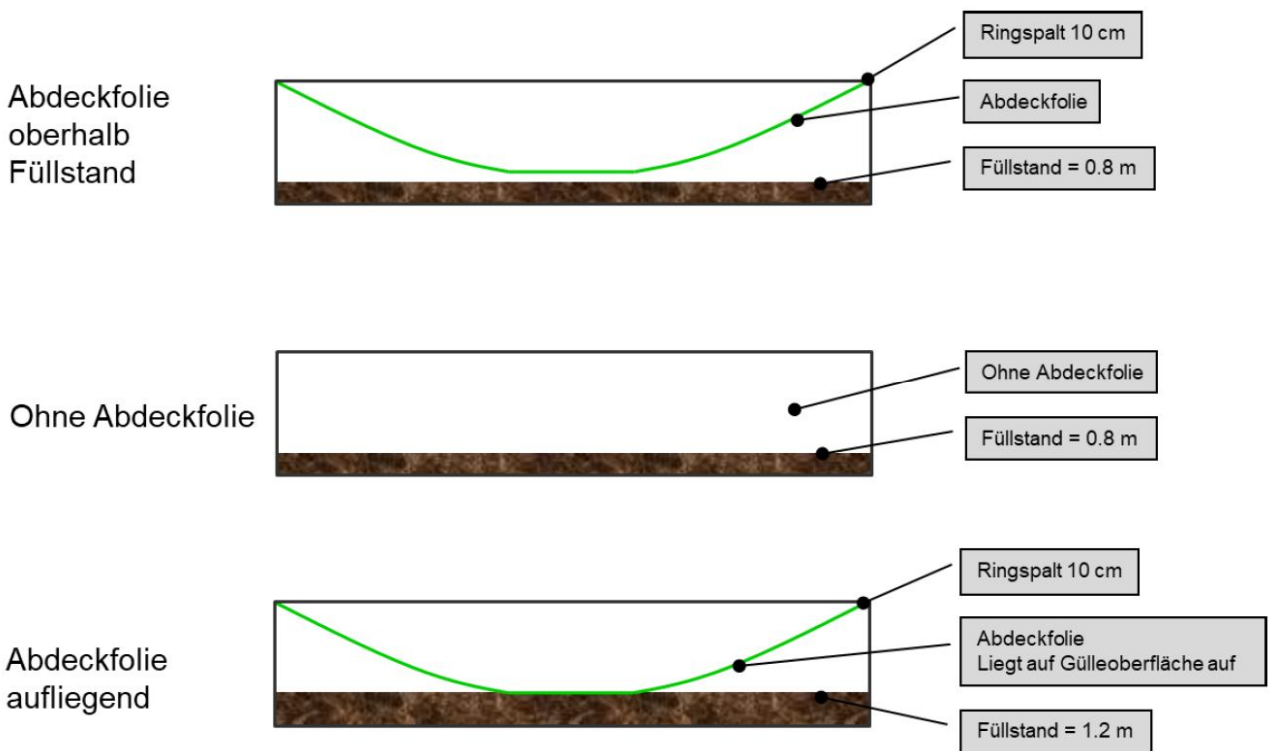


Abbildung 37: Schematischer Schnitt Güllebehälter.

Tabelle 35: Simulierte Szenarien und ihre Randbedingungen (blau hinterlegte Felder deuten auf Variationen in den Simulationsbedingungen unter den Szenarien hin)

Szenario	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Abdeckfolie	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein
Füllstand	0.8 m	0.8 m	1.2 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m
Zeitpunkt	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 Nacht 02:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr
Solarstrahlung	800 W/m ²	800 W/m ²	800 W/m ²	800 W/m ²	Keine Solarstrahlung	800 W/m ²	500 W/m ²	500 W/m ²
Lufttemperatur	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	10 °C	25 °C	25 °C	25 °C
Temperatur der Gülle	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C
Windrichtung	West (270°)	West (270°)	West (270°)	West (270°)	West (270°)	West (270°)	West (270°)	West (270°)
Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe	0.3 m/s	0.3 m/s	0.3 m/s	1.0 m/s	0.3 m/s	1.0 m/s	1.0 m/s	1.0 m/s

In den Szenarien wurde neben dem Vorhandensein oder Abwesenheit der teilschwimmenden Abdeckfolie vor allem die Windgeschwindigkeit zwischen quasi-Windstille und einer Geschwindigkeit von 1 m/s variiert. So konnte der Effekt der Thermik isoliert und in Rückkopplung mit der mechanischen (durch Wind induzierten) Turbulenz betrachtet werden. Szenario S5 stellt eine nächtliche Situation ohne thermischen Strahlungsantrieb dar und soll aufzeigen, welchen Einfluss die Gülle auf die Transportprozesse hat, wenn sie wärmer als die Umgebungsluft ist. In den Szenarien S7 und S8 wurde die solare Strahlung reduziert, um den Betrachtungszeitpunkt inkl. einem Bewölkungsgrad abzudecken.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen ausgewählte Ergebnisse der Strömungssimulation für Szenario S4.

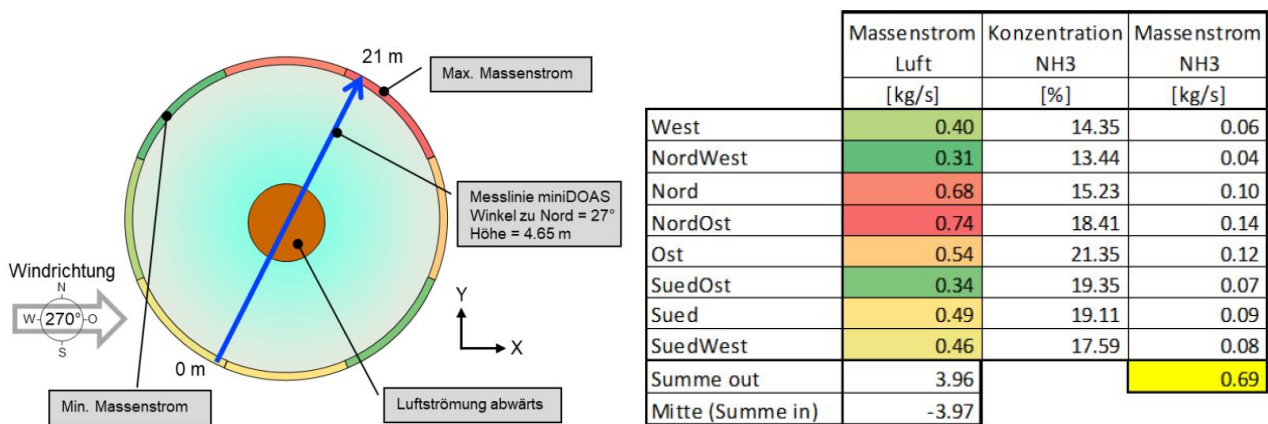


Abbildung 38: Resultate der Strömungssimulation für Szenario S4; Verteilung des Massenstromes über dem Lager mit Abdeckung (links, Draufsicht) und Auswertung des Emissions-Massenstromes, integriert über verschiedene Ausströmungssektoren (rechts).

Während aufgrund eines Kamineffektes durch die Sonneneinstrahlung und Erwärmung der Luft unter der Folie über das Mittelloch Luft eingesogen wird, entweicht sie über den Randspalt. Über alle Ein- und Ausströmungen integriert ergibt sich ein Emissions-Massenstrom von 0.69 kg/s NH₃. Die Einheit ist nicht zielführend und mitnichten mit einer realen Emission von NH₃ gleichzusetzen, da im Modell die Tracer-Konzentration an der Gülleoberfläche 100% beträgt. Der hier vorliegende Emissions-Massenstrom kann aber trotzdem gut aufzeigen, wie die Emissionsverteilung durch die Luftströmung ausgestaltet ist und kann zum Vergleich der Szenarien untereinander herangezogen werden.

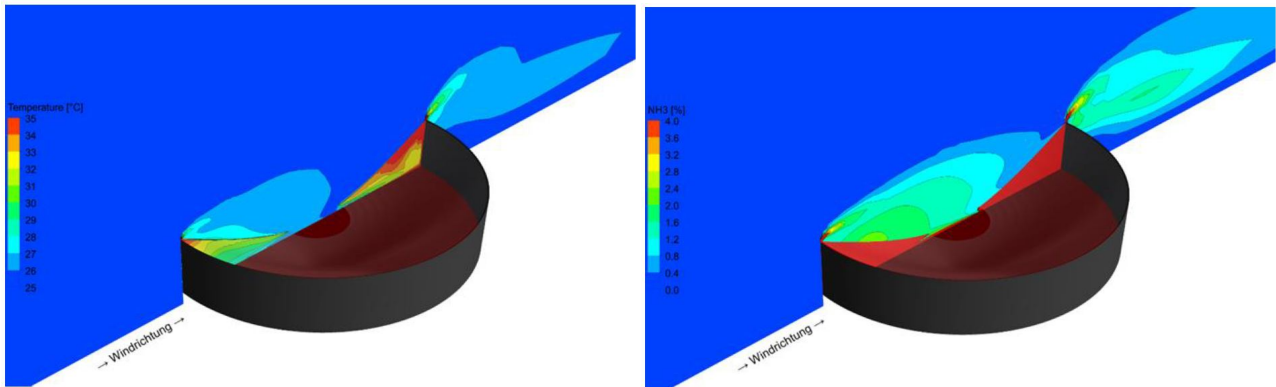


Abbildung 39: Resultate der Strömungssimulation für Szenario S4; Längsschnitt durch die Temperaturverteilung (links) und Längsschnitt durch die NH₃ Konzentrationsverteilung (relativ zur Tracer-Konzentration an der Gülleoberfläche).

Die Abbildung verdeutlicht, wie sich im Luftraum unter der Abdeckungs-Folie durch die Sonneneinstrahlung starke Temperaturgradienten ausbilden, die zum oben beschriebenen Kamineffekt führen. Dies resultiert darin, dass NH₃ über den Randspalt mit der Kaminluft ausströmt.

Tabelle 36: Simulierte Szenarien mit ihren kommentierten Ergebnissen einschliesslich entweichender Massenstrom

Szenario	S1	S2	S3	S4
Simulationsvariante	V08	V07	V09	V11
Abdeckfolie	Ja	Nein	Ja	Ja
Füllstand	0.8 m	0.8 m	1.2 m	0.8 m
Zeitpunkt	30.07.2017 Tag 14:00 Uhr	30.07.2017 Tag 14:00 Uhr	30.07.2017 Tag 14:00 Uhr	30.07.2017 Tag 14:00 Uhr
Solarstrahlung	800 W/m ²	800 W/m ²	800 W/m ²	800 W/m ²
Lufttemperatur	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C
Temperatur der Gülle	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C
Windrichtung	West (270°)	West (270°)	West (270°)	West (270°)
Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe	0.3 m/s	0.3 m/s	0.3 m/s	1.0 m/s
Ergebnis	Die Luft strömt über das Loch in der Mitte der Abdeckfolie in den Zwischenraum (Gülle - Folie) und über den Ringspalt nach oben wieder aus dem Zwischenraum ins Freie. Der Massenstrom NH ₃ beträgt 0.69 kg/s*.	Aufgrund des Temperaturgradienten an der Wand des Güllebehälters entweicht NH ₃ im Randbereich. Der Massenstrom ist mit 0.87 kg/s* grösser als mit Abdeckfolie bei gleichem Füllstand (Szenario S1).	Im Vergleich mit den Szenarien S1 und S2 ist der Massenstrom NH ₃ , welcher aus dem Behälter fliesst, mit 0.29 kg/s* am geringsten. Dies liegt am geringen Luftaustausch, weil in der Mitte keine Luft einströmen kann. Somit entweicht das NH ₃ lediglich über den Ringspalt, wo auch die Frischluft nachströmt.	Die Luft strömt über das Loch in der Mitte der Abdeckfolie in den Zwischenraum (Gülle - Folie) und über den Ringspalt nach oben wieder aus dem Zwischenraum ins Freie. Der Massenstrom NH ₃ ist mit 0.69 kg/s* gleich gross wie mit weniger starkem Wind (Szenario S1), obwohl die Verteilung des Luftmassenstromes über dem Umfang nicht identisch ist.

Tabelle 36: Fortsetzung

Szenario	S5	S6
Simulationsvariante	V12	V13
Abdeckfolie	Ja	Nein
Füllstand	0.8 m	0.8 m
Zeitpunkt	30.07.2017 Nacht 02:00 Uhr	30.07.2017 Tag 14:00 Uhr
Solarstrahlung	Keine Solarstrahlung	800 W/m ²
Lufttemperatur	10 °C	25 °C
Temperatur der Gülle	15 °C	15 °C
Windrichtung	West (270°)	West (270°)
Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe	0.3 m/s	1.0 m/s
Ergebnis	Aufgrund des fehlenden solaren Eintrags ist der thermische Auftrieb der Luft marginal. Kombiniert mit der geringen Verwirbelung aufgrund der Windrandbedingung bildet sich ein seeförmiges Reservoir oberhalb der Gülle und es entweicht lediglich ein Massenstrom NH ₃ von 0.08 kg/s*.	Der Einfluss der Windgeschwindigkeit ist ohne Abdeckfolie grösser als mit der Abdeckfolie (vgl. S1 vs S4). Aus dem Behälter fliesst ein Massenstrom NH ₃ von 0.95 kg/s*, was im Vergleich mit den untersuchten Varianten als Maximalwert gilt. Im Vergleich zum S2 liegt eine erhöhte Verwirbelung der Luft im und um den Behälter vor.

Szenario	S7	S8
Simulationsvariante	V14	V15
Abdeckfolie	Ja	Nein
Füllstand	0.8 m	0.8 m
Zeitpunkt	30.07.2017 14:00 Uhr	30.07.2017 14:00 Uhr
Solarstrahlung	500 W/m ²	500 W/m ²
Lufttemperatur	25 °C	25 °C
Temperatur der Gülle	15 °C	15 °C
Windrichtung	West (270°)	West (270°)
Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe	1.0 m/s	1.0 m/s
Ergebnis	Die Luft strömt über das Loch in der Mitte der Abdeckfolie in den Zwischenraum (Gülle - Folie) und über den Ringspalt nach oben wieder aus dem Zwischenraum ins Freie. Der Massenstrom NH ₃ ist mit 0.59 kg/s* etwas geringer als im Szenario S4, bei welchem eine höhere solare Last simuliert wurde. Weil der thermische Auftrieb sowie die Temperaturwerte zwischen der Gülloberfläche und Abdeckfolie geringer als im Szenario S4 sind, strömt im direkten Vergleich weniger Luft nach oben.	Aus dem Behälter fliesst ein Massenstrom NH ₃ von 0.87 kg/s*, was im Vergleich mit dem Szenario S6 leicht geringer ist. Ähnlich wie im Szenario S7 reduziert die geringere solare Last den thermischen Auftrieb. Somit wird der NH ₃ -Austritt massgeblich vom Strömungs- und Ablöseverhalten des Windes bestimmt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Resultate und die daraus resultierenden Erkenntnisse/Empfehlungen aus der Analyse aller Szenarien zusammengefasst:

- Die Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich ohne Abdeckfolie mehr NH₃ mit dem Massenstrom aus dem Güllelager entweicht als mit der Abdeckfolie (unabhängig vom Füllstand). Rein aufgrund der Strömungsbetrachtung verursacht die Abdeckung eine Reduktion von 20% bis ca. 70% der Emissionen.
- Mit der Abdeckfolie strömt die Luft bei freischwebender Folie über das Loch in der Mitte der Abdeckfolie in den Zwischenraum (Gülle - Folie) und über den Ringspalt nach oben wieder aus dem Zwischenraum ins Freie.
- Der austretende NH₃ Massenstrom ist im Quervergleich aller Szenarien mit dem Füllstand von 1.2 m, welcher das Loch der Abdeckfolie schliesst, am geringsten.
- Mit der Abdeckfolie haben die untersuchten Windgeschwindigkeiten einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Entweichung des NH₃.

- Ohne Abdeckfolie entweicht mit der höchsten simulierten Windgeschwindigkeit von 1.0 m s^{-1} (auf 10 m Höhe) aufgrund der Verwirbelung am Güllelager (mechanische Effekte) ungefähr 10% mehr NH_3 (Massenstrom = 0.95 kg s^{-1} , entspricht Maximalwert aus der Simulationsreihe) aus dem Güllelager als mit der Anströmung von 0.3 m s^{-1} . Es wird erwartet, dass sich dieser Effekt mit höheren als den hier berücksichtigten Windgeschwindigkeiten weiter intensiviert.
- Im windarmen Nachtfall mit Abdeckung (Szenario S5) wird das Volumen direkt oberhalb der Gülle mit NH_3 stark angereichert. Die um 5°C gegenüber der Aussenluft wärmere Gülle führt nicht zu einem nennenswerten thermischen Auftriebsstrom. Aufgrund des fehlenden thermischen Auftriebs und der geringen Turbulenz stellt sich kaum eine Bewegung der Luft ein.
- In den Szenarien mit reduzierter Solarstrahlung von 500 W m^{-2} (Szenario S7, S8) strömt im direkten Vergleich weniger Luft nach oben, weil der thermische Auftrieb sowie die Temperatur zwischen der Gülleoberfläche und Abdeckfolie geringer sind, als in den Szenarien mit Solarstrahlung = 800 W m^{-2} .
- Die Ergebnisse zeigen, dass bei den simulierten Windgeschwindigkeiten (0.3 m s^{-1} s und 1 m s^{-1} auf 10 m Höhe) die Konvektion am Güllelager die ausschlaggebende Kraft für die Strömung darstellt (thermisch induzierter Transport). Diese Schlussfolgerung gilt für das Güllelager mit und ohne Abdeckung.

Aus den Erkenntnissen dieser Untersuchung wird die folgende allgemeine Abstufung des entweichenden Massenstromes abgeleitet:

Zustand	Abdeckfolie	Füllstand Gülle	Entweichender Massenstrom NH_3 im direkten Vergleich
A	Ja	Die Folie liegt auf der Gülle auf, d.h. das Loch in der Mitte ist geschlossen	Am geringsten
B	Ja	Unterhalb der Folie, d.h. das Loch in der Mitte ist offen	Zwischen Zustand A und C
C	Nein	0.8 m – 1.2 m	Am höchsten

Diese Ergebnisse stützen die empirischen Ergebnisse aus den Messungen am Güllelager, bei denen die Abdeckung ebenfalls ihre grösste Minderungswirkung entfaltet, wenn der Füllstand grösser als 1 m war und das Loch dementsprechend verschlossen wurde. Die Strömungssimulation bildet nur ausgewählte Situationen ab und betrachtet ausschliesslich die thermisch und mechanisch verursachten Transportprozesse. Die rein aufgrund der Strömungsverhältnisse am Lager abgeleiteten Minderungswirkungen der teilschwimmenden Abdeckung (rund 20 bis 70%) bewegen sich allerdings in dem gleichen Bereich, wie die Minderungswirkungen die aus den Messungen abgeleitet wurden. Dies zeigt, dass der Luftaustausch einen zentralen Faktor bei den Emissionsvorgängen darstellt. In der Realität wird die Emission zusätzlich durch Wechselwirkungen mit der Schwimmschicht, der Luft- und Gülletemperatur, biologischen und chemischen Vorgängen, dem Niederschlag etc. beeinflusst. Ungeachtet dessen liefert die Strömungssimulation eine wertvolle Ergänzung um Prozessverständnis und eine Plausibilisierung der Messungen.