Berner
Fachhochschule

Temperatur von Gülle während der Lagerung



20. Juni 2026

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Klimaberichterstattung und Anpassung Abt. Klima, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, 3052 Zollikofen

Autoren: Thomas Kupper, Alex Valach, Simon Bowald, Alexander Burren, Martin Häberli-Wyss, Christoph Häni

Begleitung BAFU: Michael Bock, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Daniel Bretscher (Agroscope), Simone von Känel Hofstetter (BAFU)

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

Zusammenfassung 5
1. Ausgangslage und Zielsetzung 6
2. Methodisches Vorgehen 7
2.1 Übersicht 7
2.2 Auswahl Messgeräte 7
2.3 Testphase Messgeräte 8
2.4 Messkampagnen 8
2.4.1 Auswahl der Messstandorte 8
2.4.2 Übersicht 8
2.5 Kontinuierliche Temperaturmessungen mit fix installierten Geräten 10
2.6 Periodische Temperaturmessungen mit mobilen Geräten 13
2.7 Quervergleiche der Messgeräte 19
2.8 Schätzung der Methanemissionen basierend auf der Lufttemperatur und der gemessenen Gülletemperatur 20
3. Resultate und Diskussion 21
3.1 Betrieb der Messgeräte 21
3.1.1 Kontinuierliche Messungen 21
3.1.1.1 Installation der Messgeräte im Güllelager 21
3.1.1.2 Messgeräte im Dauerbetrieb 22
3.1.2 Periodische Messungen 22
3.2 Quervergleiche der Messgeräte 23
3.3 Messmethodik 26
3.3.1 Messgeräte und Datenübertragung 26
3.3.2 Methodik der Erfassung der Gülletemperatur 26
3.3.2.1 Repräsentativität der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen 26
3.3.2.2 Repräsentativität der periodisch gemessenen Gülletemperaturen 29
3.4 Messresultate 29
3.4.1 Kontinuierliche Messungen 31
3.4.1.1 Füllstand und Durchmischen der Gülle 31
3.4.1.2 Gülletemperaturen im Vergleich zu den Temperaturen der Umgebungsluft 32
3.4.1.3 Temperaturen der Umgebungsluft, in Stall, Laufhof und Headspace des Güllelagers 35
3.4.2 Periodische Messungen 36
3.5 Schätzung der Methanemissionen basierend auf der Lufttemperatur und der gemessenen Gülletemperatur 40
3.6 Protokoll für Temperaturmessungen von Güllelagern: Empfehlungen 41
4. Schlussfolgerungen und Ausblick 43
5. Verdankungen 44
6. Literaturverzeichnis 45
Anhang 1 47
Für die Messungen eingesetzten Geräte 47
Anhang 2 48
Zeitfenster mit Erfassung von Gülletemperaturen Betrieb 11 48

Zeitfenster mit Erfassung von Gülletemperaturen Betrieb 12 49
Anhang 3 50
Positionen der Messgeräte auf den Betrieben 1 bis 12 50
Anhang 4 55
Ergebnisse der Gülletemperaturmessungen der Testphase von Betrieb 1 55
Anhang 5 56
Ergebnisse der Gülletemperaturmessungen der Testphase von Betrieb 6 56
Anhang 6 57
Regelmässig auftretende Messausfälle von Betrieb 12 (Beispiele) 57
Anhang 7 58
Übersicht Messdaten kontinuierliche Messungen 58
Anhang 8 59
Kontinuierlich gemessene Gülletemperaturen Sensor unten und Mitte von Betrieb 11 und 12 sowie 59
Anhang 9 60
Kontinuierlich gemessene Gülletemperaturen und Vergleich mit der Umgebungstemperatur auf Betrieb 11 und 12 60
Anhang 10 61
Kontinuierlich gemessene sowie modellierte Gülletemperaturen und Vergleich mit der Umgebungstemperatur auf Betrieb 11 und 12 61
Anhang 11 62
Kontinuierlich gemessene Lufttemperaturen auf Betrieb 11 und 12 62
Anhang 12 63
Periodisch gemessene Gülletemperaturen und Füllstandswerte von 17 Lagerbehältern 63
Anhang 13 67
Merkmale von Ställen für Rindvieh mit perforierten bzw. planbefestigten Laufflächen 67
Anhang 14 68
Schätzung der Methanemissionen der Güllelager 1 von Betrieb 11 und 12 basierend auf der Lufttemperatur und der Gülletemperatur 68

Zusammenfassung

Im Rahmen des revidierten CO2-Gesetzes und des Übereinkommens von Paris der Klimakonvention der Vereinten Nationen ist die Schweiz verpflichtet, regelmässig über den aktuellen Stand der Treibhausgasemissionen im Hinblick auf die Reduktionsziele zu berichten. Innerhalb der Landwirtschaft ist Methan aus der Güllelagerung eine wichtige Quelle. Die Methanemissionen hängen vor allem von der Menge von abbaubarem Kohlenstoff und der Gülletemperatur ab. Für die Berechnung des Treibhausgasinventars wird aktuell die Umgebungstemperatur als Proxy für die Temperatur im Güllelager verwendet. Studien haben gezeigt, dass die Umgebungstemperatur stark von der Gülletemperatur abweichen kann. In der Schweiz wurden Gülletemperaturen bisher nicht gemessen.

In diesem Kontext hat die vorliegende Studie die folgenden Ziele: i) Erarbeitung einer Methodik zur Messung von Gülletemperaturen auf landwirtschaftlichen Betrieben, ii) Generierung erster Messdaten der Gülletemperatur und Vergleich mit der Umgebungstemperatur, iii) Vorschlag einer Methode zur Generierung von Messdaten von Gülletemperaturen. Die Methodik muss an die wegen häufiger Durchmischung der Gülle und Abdeckung der Güllelager schwierigen Bedingungen in der Schweiz angepasst sein.

Insgesamt erfolgten Messungen in 19 Lagern auf 12 Betrieben. In 2 Lagern erfolgten kontinuierliche, in den übrigen periodische Messungen. Die Gülletemperaturen zeigten einen Jahresgang mit längerfristigen Temperaturschwankungen und einem Minimum im Winter sowie einem Anstieg bis zum Maximum im Sommer. Die Umgebungstemperatur wies ein ähnliches Profil auf, jedoch mit kurzzeitigen Schwankungen. Die Gülletemperatur lag im Winter über und im Sommer meist niedriger im Vergleich zur Umgebungstemperatur. Im Herbst lag eine Überhöhung der Gülletemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur vor, was mit früheren Studien übereinstimmt. Die Jahresmittelwerte der Gülletemperaturen der untersuchten Lager zeigten eine Überhöhung gegenüber der mittleren Lufttemperatur von rund 2˚C für Unterflurlager. Für Vorgruben und Silos betrug die Überhöhung rund 3.5 bis 5˚C.

Die Güllelager zeigten einen Temperaturgradienten: bei Umgebungstemperaturen, die niedriger waren als die Gülletemperatur, wurde die Gülle von der Oberfläche her abgekühlt und umgekehrt bei Umgebungstemperaturen, welche höher lagen als die Gülletemperatur. Dieses Muster war nur bei den kontinuierlichen Messungen eindeutig feststellbar. Der Einfluss dieses Gradienten auf die mittlere Gülletemperatur war jedoch klein, da der Füllstand überwiegend niedrig war. Die räumliche Variabilität der Gülletemperaturen innerhalb der Lager war begrenzt. Somit liess sich die Gülletemperatur mit einem Sensor ca. 50 cm ab Boden der Güllelager ausreichend genau erfassen, wobei die Unsicherheit der gemessenen Gülletemperaturen auf 1 bis 3˚C geschätzt wird.

Verschiedene Typen von Güllelagern (Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung, Unterflurlager mit fester Abdeckung, Vorgruben mit fester Abdeckung, Güllesilos) zeigten geringe Unterschiede der Gülletemperatur. Einzig ein Silo mit Zeltdachabdeckung wies höhere Werte auf. Gülletemperaturen in Lagern beschickt mit Gülle aus frei gelüfteten Rindviehställen mit planbefestigten oder perforierten Laufflächen unterschieden sich kaum.

Die Verwendung der Gülletemperatur anstelle der Lufttemperatur für die Modellierung der Methanemissionen der zwei kontinuierlich gemessenen Güllelager führte zu höheren Emissionen (plus 5% und 36%). Dies suggeriert, dass mit der aktuellen Methodik basierend auf der Lufttemperatur die Methanemissionen eher unterschätzt werden.

Für eine Verwendung der Gülletemperatur anstelle der Lufttemperatur zur Berechnung der Methanemissionen des Treibhausgasinventars sind zusätzliche, systematisch erhobene Messdaten erforderlich. Diese könnten mittels kontinuierlicher oder periodischer Messungen generiert werden.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Im Rahmen des revidierten CO2-Gesetzes und des Kyoto-Protokolls ist die Schweiz verpflichtet, im Hinblick auf die festgelegten Reduktionsziele regelmässig über den aktuellen Stand der Treibhausgasemissionen zu berichten (BAFU, 2018). Innerhalb der Landwirtschaft ist Methan (CH_4) aus «Manure management» eine wichtige Quelle (ca. 10% der landwirtschaftlichen THG-Emissionen, ca. 2% der gesamtschweizerischen THG-Emissionen). Die Methanemissionen hängen vor allem von der Menge Substrat bzw. der Menge von abbaubarem Kohlenstoff (VS=Volatile solids), von dessen Verbleib (anaerob oder anaerobe Bedingungen), der Dauer der Lagerung der VS und der Temperatur während der Lagerung ab. Die grösste Menge der VS, die anaeroben Bedingungen unterliegen, liegt in der Landwirtschaft mit den Ausscheidungen von Rindvieh und Schweinen vor, die insgesamt zu rund 70% in Form von Gülle anfallen (Kupper et al., 2022).

Methanemissionen aus «Manure management» werden im schweizerischen Treibhausgasinventar mittels Modellrechnungen geschätzt (Bretscher, 2019; IPCC, 2019). Inzwischen wurden Modelle aufgrund von experimentellen Arbeiten überprüft oder erarbeitet (Balde et al., 2016a; Dalby et al., 2021a,b).

Die Herleitung der Methanemissionen basiert u.a. auf dem methane conversion factor (MCF), welcher stark von der Temperatur im Bulk der VS bzw. im Güllelager abhängt (Gleichung 1; Mangino et al., 2001)

$$EF = VS \times 365\ \text{days/yr} \times B_o \times 0.662 \times \sum MCF_{jk} \times MS_{jk} \qquad \text{Gleichung 1}^{1}$$

Als Proxy für die Temperatur im Güllelager wird aktuell die Umgebungstemperatur verwendet (Bretscher, 2019). Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Umgebungstemperatur stark von der Gülletemperatur abweichen kann (Balde et al., 2016a; Hafner, Mjöfors, 2023; Vanderzaag et al., 2022).

Aktuell ist die Abweichung zwischen mittlerer Umgebungstemperatur und der Temperatur in der Gülle schwierig einzuschätzen, da weltweit nur wenige und in der Schweiz gar keine Messdaten vorliegen.

In diesem Kontext hat die vorliegende Studie die folgenden Ziele:

- Erarbeitung einer Methodik zur Messung der Güllelagertemperatur unter Praxisbedingungen
- Generierung erster Messdaten der Gülletemperatur von in der Schweiz häufigen Typen von Güllelagern und Vergleich mit der Umgebungstemperatur
- Vorschlag einer Methode zur Generierung von Messdaten von Gülletemperaturen

[1] EF= annual emission factor for defined animal population (kg CH_4/yr)
VS = daily volatile solids excreted for an animal within defined population (kg/day)
B_o= maximum methane-producing capacity for manure produced by an animal within defined population (m^3 CH_4/kg VS)
0.662 = conversion factor of m^3 CH_4 to kilograms CH_4 (kg CH_4 /m^3 CH_4)
MCF_{jk} = methane conversion factor for each manure management system *j* by climate region *k*
MS_{jk} = fraction of defined animal population's manure handled using manure system *j* in climate region *k*

2. Methodisches Vorgehen

2.1 Übersicht

Das Vorgehen im Rahmen dieser Studie besteht aus den folgenden Arbeitsschritten:

1. Evaluation und Beschaffung von Sensoren zur Messung von Gülle- und Umgebungstemperatur sowie der Datenmanagements. Im Vordergrund stehen automatisiert betreibbare low-cost Systeme, die bei Verlust keine Schäden von Betriebseinrichtungen verursachen (z.B. Beschädigung von Pumpen oder Rührwerken). Sie müssen eine Temperaturmessung in einer Tiefe von bis zu 6 m erlauben.
2. Test dieser Messsysteme unter Praxisbedingungen.
3. Einsatz der Messsysteme auf ausgewählten Betrieben und Messung der Gülletemperatur über die Jahreszeiten Winter, Übergangszeit, Sommer.
4. Erarbeitung eines Messprotokolls bei den Güllelagern (Messpunkte: Anzahl, Tiefe, seitlicher Abstand zu Seitenwänden; Berücksichtigung von Befüllung, Durchmischen der Lager).

2.2 Auswahl Messgeräte

Die für die Messung eingesetzten Geräte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Auswahl waren Messbereich und Genauigkeit, die Möglichkeit zur kontinuierlichen, drahtlosen Datenübertragung sowie die Kosten die prioritären Kriterien. Für die Datenspeicherung wurde Grafana (grafana.com) gewählt. Grafana ist eine plattformübergreifende Open-Source-Anwendung zur Ablage und grafischen Darstellung von Daten aus verschiedenen Datenquellen. Von dort erfolgte die Datenübertragung auf einen Server der Berner Fachhochschule alle 24 Stunden.

Tabelle 1: Zweck und Typ der eingesetzten Messgeräte, Messbereich, Auflösung und Genauigkeit sowie Anschaffungskosten pro Stück (Abbildungen der Geräte in Anhang 1). Messw. steht für die Anzahl der aufgezeichneten Messwerte pro Stunde während der Messkampagnen.

Messung	Gerätetyp	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit	Kosten/ Stk. CHF	Messw. ##
Gülletemperatur kontinuierlich*	LTC2 -- Industrial LoRaWAN Temperature Transmitter	-50-200˚C	0.01˚C	± 0.8˚C; 0~80˚C	65.90	~60 h^{-1}
Gülletemperatur periodisch*	TC01-LB LoRaWAN Thermocouple Converter Node 868MHz	-50-200˚C	-	-	65.90	420-480 h^{-1}
Temperatur von Umgebung, Stall, Laufhof oder Headspace im Güllelager kontinuierlich/periodisch*	S31-CB/S31B-CB -- NB-IoT/LTE-M Outdoor Temperature and Humidity Sensor	-40-80˚C	0.01˚C	± 0.2˚C; 0~90˚C	69.90	~60 h^{-1}
Füllstand Güllelager kontinuierlich**	DDS75-NB -- NB-IoT Distance Detection Sensor	280 mm – 7500 mm	0.1 cm	±(1cm+S* 0.3%) (S: Distanz)	75.90	~60 h^{-1}
Zeitstempel***	WisNode LoRa Button 4K	-	-	-	46.90	-
Datenübertragung	LPS8N Indoor LoRaWAN Gateway auf auf Grafana#	-	-	-	229	-

*Quelle: https://www.dragino.com/products/temperature-humidity-sensor.html; betr. Langfristigem Drift (Long Term Shift): <0.03 ˚C/yr

**Quelle: https://www.dragino.com/products/distance-level-sensor.html

***Quelle: https://www.rakwireless.com/en-us/products/lpwan-boards-and-nodes/rak612

#Quelle: https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/200-lps8n.html

##Anzahl der aufgezeichneten Messwerte pro Stunde während der Messkampagnen

2.3 Testphase Messgeräte

In einer ersten Phase wurden die Geräte zur kontinuierlichen Messung der Gülletemperatur sowie Umgebungstemperatur auf 3 Betrieben (Betriebe 1, 6 und 10, Tabelle 2) installiert. Zusätzlich erfolgten periodische Messungen in diesen Güllelagern. Die Testphase dauerte vom Frühjahr bis Sommer 2024.

2.4 Messkampagnen

2.4.1 Auswahl der Messstandorte

Die Datenlage zum Vorkommen der wichtigsten Typen von Güllelagern in der Schweiz ist wie folgt (Kupper et al., 2022; angegeben ist der Anteil am totalen Lagervolumen:

- Unterflurlager
  - mit fester Abdeckung (Anteil: ≤74%).
    Vorgruben mit einer festen Abdeckung können einem Unterflurlager mit fester Abdeckung gleichgestellt werden. Sie dienen zur Zwischenlagerung von Gülle vor dem Umpumpen in ein Endlager und haben daher in der Regel ein kleineres Volumen.
  - mit perforierter Abdeckung, die in der Regel als Lauffläche für einen Laufhof dient (Anteil: 15%).
- Silos
  - ohne Abdeckung (Anteil: 10%; ungedeckte Güllelager müssen mit einer dauerhaft wirksamen Abdeckung zur Begrenzung der Ammoniak- und Geruchsemissionen nachgerüstet werden; BAFU, BLW, 2011; KVU-KOLAS, 2022; Schweizerischer Bundesrat. 2026).
  - mit Abdeckungen wie Betonhohldecke, Zeltdach, teilschwimmende Folie, Holzkonstruktion (Anteil Zeltdach: 1%; Anteil Schwimmfolie: <1%; Silos mit Betonhohldecke oder Holzkonstruktion sind in unter Güllelagern mit «fester Abdeckung Beton, Holz» eingeschlossen)

Die Tierkategorien, welche den grössten Anteil von Gülle produzieren, sind Milchkühe und Mastschweine. Bei Milchkühen ist das wichtigste Stallsystem der Laufstall mit Liegeboxen und Produktion von Vollgülle. Bei den nächstwichtigsten Rindviehkategorien Mutterkühen und Masttieren herrschen Systeme mit Produktion von Gülle und Mist vor. Bei Mastschweinen sind geschlossene Ställe und Labelställe mit Mehrflächenbucht und Auslauf ähnlich stark verbreitet (Kupper et al., 2022).

Die Verbreitung der oben aufgeführten Typen von Güllelagern sowie die wichtigsten Tierkategorien und Stallsysteme wurden bei der Auswahl der Messstandorte berücksichtigt.

2.4.2 Übersicht

Nach Abschluss der Testphase wurden im Herbst 2024 auf 2 Betrieben Geräte zur kontinuierlichen Messung der Gülletemperatur sowie der Temperaturen im Stall, im Laufhof und in der Umgebung (Betriebe 11, 12, Tabelle 2) installiert. Auf weiteren 9 Betrieben erfolgten ab Frühjahr 2025 zusätzlich periodische Messungen der Gülletemperatur. Während dieser Messungen wurde jeweils auch die Umgeungstemperatur erfasst. Auf allen Betrieben wurde zusätzlich der Füllstand der Lager gemessen. Auf den Betrieben 11 und 12 erfolgte dies kontinuierlich mit Füllstandssensoren. Auf den übrigen Betrieben wurde der Füllstand gleichzeitig mit den Temperaturmessungen manuell erhoben.

Mit den kontinuierlichen Messungen liess sich die Gülletemperatur über ein ganzes Jahr automatisiert und zeitlich hoch aufgelöst erfassen. Der Zweck der periodischen Messungen war die Untersuchung der räumlichen Variabilität der Gülletemperatur in Güllelagern sowie die Erweiterung der Datengrundlage von Gülletemperaturen für verschiedene Güllelagerty-

pen. Weiter liess sich mit den periodischen Messungen auf den Betrieben 11 und 12 die Repräsentativität der Messstellen der kontinuierlichen Temperaturmessung überprüfen (vgl. Kap. 3.1.1).

Von den 12 ausgewählten Betrieben hatten alle ein Unterflurlager, davon 8 mit fester Abdeckung (davon 3: Vorgrube), 5 mit einer perforierten Abdeckung. 5 Betriebe hatten einen Silo, davon waren 3 aus Beton und 2 aus Email. Ein Silo hatte eine Zeltdachabdeckung, die übrigen Silos waren ungedeckt. 2 Betriebe hatten 3 verschiedene Güllelager, 2 Betriebe 2 Güllelager und die Übrigen ein Güllelager. Auf den Betrieben wurden jeweils in sämtlichen vorhandenen Lagern die Gülletemperaturen periodisch gemessen.

Tabelle 2: Ablauf der Messungen auf den Betrieben (B) 1 bis 12. L steht für die Nummer des Lagers. Typ der Messungen: kontinuierlich oder periodisch; bei sämtlichen Betrieben mit kontinuierlicher Messung wurden zusätzlich auch periodisch Messungen durchgeführt, sowie Anzahl der periodischen Messungen (n Messung per.), Typ Güllelager (Typ Güllela.).

B	L	Phase	Zeitraum Messung	Messung Typ	n Messung per.	Typ Güllela.*
1	1	Testphase	30.03.2024-28.05.2024	kontinuier-lich/periodisch	5	u_L_per
2	1	Messung	20.03.2025-24.02.2026	periodisch	14	Unt_fe
	2					u_L_per
	3					Silo_un_E
3	1	Messung	19.03.2025-25.02.2026	periodisch	14	Unt_fe
4	1	Messung	20.03.2025-25.02.2026	periodisch	11	Silo_un_B
	2				7	Vorg_Unt_fe
5	1	Messung	19.03.2025-24.02.2026	periodisch	9	u_L_per
6	1	Testphase	06.06.2024-06.06.2024	kontinuierlich**/ periodisch	3	Silo_un_B***
	2	Messung	20.03.2025-25.02.2026		12	Unt_fe
7	1	Messung	28.03.2025-24.02.2026	periodisch	14	Unt_fe
8	1	Messung	28.03.2025-25.02.2026	periodisch	11	u_L_per
9	1	Messung	09.06.2025-24.02.2026	periodisch	8	Vorg_Unt_fe
	2					Silo_un_E
10	1	Testphase	02.04.2024-12.07.2024	kontinuierlich**/ periodisch	3	u_L_per
		Messung	09.06.2025-24.02.2026		8	
11	1	Messung	11.11.2024-06.02.2026	kontinuierlich	24	u_L_per
	2				13	Unt_fe
12	1	Messung	14.11.2024--06.02.2026	kontinuierlich	21	Silo_Ze_B
	2				21	Vorg_Unt_fe
	3				14	Kanal_per

* Typ Güllelager
Kanal_per: Kanal mit perforierter Abdeckung
Silo_B_un: Silo, Material: Beton, ungedeckt
Silo_B_Ze: Silo, Material: Beton, mit Zeltabdeckung
Silo_E_un: Silo, Material: Email, ungedeckt
u_L_per: Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung
Unt_fe: Unterflurlager mit fester Abdeckung
Vorg_Unt_fe: Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung

**Testweise erfolgten kontinuierliche und periodische Messungen im Jahr 2024. 2025 und 2026 wurden ausschliesslich periodische Messungen durchgeführt.

***Endlager für Gülle nach Vergärung

Auf allen Betrieben mit Milchkühen (9 Betriebe) kam das System Laufstall mit Liegeboxen und Produktion von Vollgülle vor. Ein Betrieb hatte einen Labelstall für Mastschweine. Ein Betrieb mit Schweinezucht hielt die Galtsauen in einem System mit Mehrflächenbucht und Auslauf und die säugenden Sauen sowie die Absetzferkel in einem geschlossenen Stall. Je ein Betrieb hatte Mutterkühe bzw. betrieb Rindviehmast mit einem Stallsystem mit einer nicht strukturieren Liegefläche und einer planbefestigten Fläche entlang der Fressachse. Diese Systeme produzierten Mist und kotarme Gülle, d.h. Gülle mit einem im Vergleich zu Vollgülle tieferen Trockensubstanzgehalt. Weitere Informationen zu den Betrieben sind in Tabelle 3 enthalten.

Die Daten der Messkampagnen auf den einzelnen Betrieben sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Betriebe befanden sich in der Umgebung von Bern (Abbildung 1). Die Beschreibung der Messmethoden sind für die kontinuierlichen Messungen in Kap. 2.5 und für die periodischen Messungen in Kap. 2.6 beschrieben.

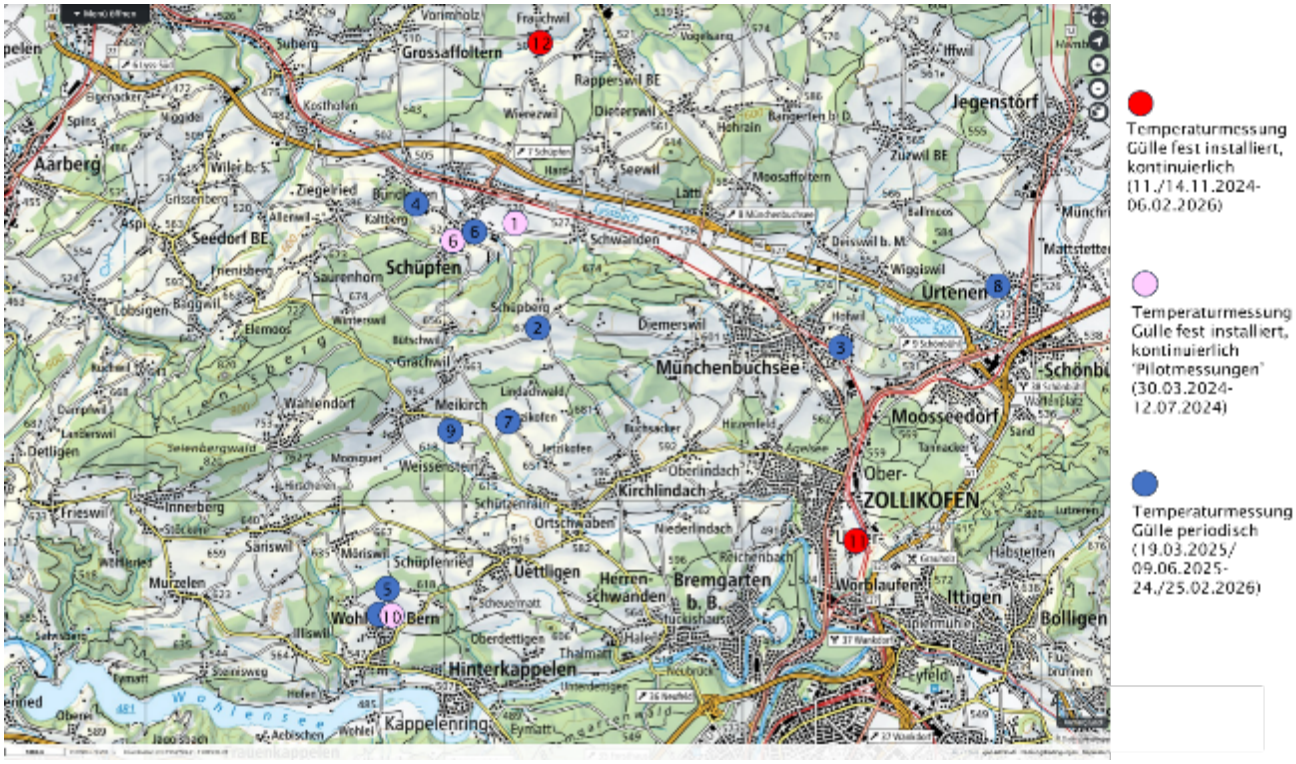


Abbildung 1: Standorte der Betriebe, auf welchen die Temperaturmessungen durchgeführt wurden.

2.5 Kontinuierliche Temperaturmessungen mit fix installierten Geräten

Die Geräte für kontinuierliche Messungen wurden an einer Stelle der Güllelager installiert, die zugänglich war. Für Lager mit einer festen Abdeckung ist dies eine Öffnung in der Betondecke. Für ungedeckte Silos wurden die Geräte vom Rand aus installiert. Die Geräte mussten ausserhalb des Bereichs von Rührwerken, Pumpen oder Zufuhrleitungen liegen. Weiter sollten die Geräte während Ereignissen wie Durchmischung der Behälter oder Umpumpen etc. mit wenig Aufwand aus den Behältern entfernt werden können.

Die Sensoren zur Messung der Gülletemperatur (Typ: LTC2; Tabelle 2) wurden im Abstand von 0.5 m, 1.5 m und 2.5 m vom Boden der Lager platziert (Bezeichnung im Folgenden als unten, Mitte, oben). Die Festlegung der Messpositionen erfolgte mittels Fixierung der Sensoren an einer verzinkten Rundstahlkette (maximale Belastbarkeit 160 kg oder 200 kg mit einem Rasengitter oder Kalksandstein als Gewicht (13.5 kg bzw., ca. 6-7 kg) an deren unteren Ende (Abbildung 2). Die Kette wurde beim Einsetzen gespannt und am oberen Ende an einem Gitterrost (Betrieb 11, Unterflurlager) oder an der Aussenwand des Silos (Betrieb

12) fixiert. Der Abstand zu einer Seitenwand des Lagers betrug 0.3 m bis 1.5 m. Zusätzlich wurde in ca. 10 cm Abstand von der Decke des Lagers ein Sensor (Typ: S31) zur Messung der Temperatur im Headspace des Güllelagers (=Luftraum zwischen Gülleoberfläche Abdeckung des Lagers) installiert. Sensoren zur Messung der Lufttemperatur wurden im Stall, im Laufhof und in der Umgebung des Betriebs platziert. Die Mesung des Füllstands des Lagers erfolgte mittels Sensoren des Typ: DDS75. Diese messen die Distanz zwischen dem Sensor und der Gülloberfläche mittels Ultraschall. Die Messgeräte wurden in Plastikbeutel[2] eingepackt und möglichst wasserdicht verschlossen.

Kontinuierliche Messungen erfolgten in der Testphase im Frühjahr 2024 auf den Betrieben 1, 6 und 10. Von Mitte November 2024 bis Beginn Februar 2026 wurden kontinuierliche Messungen auf den Betrieben 11 und 12 durchgeführt (Tabelle 2).



Abbildung 2: Material zur kontinuierlichen Messung der Gülletemperatur. Links: Kette zur Fixierung der Temperatursonden im Abstand von 0.5 m, 1.5 m und 2.5 m vom Boden der Güllelager (links unten: der schlussendlich verwendete Typ Kalksandstein als Gewicht anstelle des abgebildeten Rasengittersteins). Rechts: Fixierung der Geräte am Abdeckgitter des Güllelagers von Betrieb 11.

Der Füllstand der Gülle in den Lagern variiert über die Zeit. Daher messen die Geräte nur dann die Gülletemperatur, wenn der Füllstand höher liegt als die Position der Messgeräte. Demzufolge war es notwendig, diejenigen Zeitabschnitte zu definieren, in denen die Temperatursensoren in die Gülle eingetaucht waren. Ursprünglich war geplant, diese Zeitfenster mittels Füllstandsmessung festzulegen. Es zeigte sich jedoch aus den folgenden Gründen eine gewisse Unschärfe bei der Füllstandsmessung:

- Die Gülleoberfläche war in beiden Lagern über den ganzen Behälter verteilt unterschiedlich hoch. Dies kommt daher, dass Feststoffe auf der Oberfläche aufschwimmen, die sich nicht gleichmässig über den Behälter verteilen. Da der Füllstandssensor nicht an der exakt gleichen Stelle platziert war wie die Kette mit den Temperatursensoren, wich der

[2] Produkt Einmalüberschuh mit Gummizug, Materialstärke: 0,070 mm aus Polyethylen; https://www.landi.ch/shop/stallartikel-zubehoer_120102/einmalueberschuh-mit-gummizug_23947 (23.04.2026)

gemessene Füllstand von der Gülletiefe an der Stelle der Temperatursensoren um einige cm ab.

- Beim Aufrühren der Gülle entsteht Schaum, der von den Sensoren als Oberfläche registriert wird. Der tatsächliche Füllstand wird dabei um die Schaumhöhe überschätzt.
- Der Füllstandssensor zeigte keine exakte vertikale Ausrichtung gegen die Gülleoberfläche, da aus praktischen Gründen eine starr fixierte Installation des Sensors nicht möglich war. Weiter wies auch der Abstand der Temperatursensoren zum Boden der Güllelager eine gewisse Unschärfe auf, da eine vertikale Ausrichtung der Kette nicht gegeben war. Denn die Kette liess sich nicht ausreichend straff anziehen und wurde wegen der periodischen Durchmischung der Gülle in horizontaler Richtung leicht verschoben.

Daher wurden zusätzlich zum Füllstand die Variabilität der angezeigten Temperaturen der fest installierten LTC2 Sensoren zur Festlegung der Messperioden beigezogen. Da die Gülle ihre Temperatur nur sehr langsam ändert, kann man davon ausgehen, dass während Perioden mit nahezu konstanter Anzeige der Gülletemperatur die Sensoren die Gülletemperatur erfassten. Das Vorliegen einer raschen Temperaturänderung wurde daher durch das Absinken des Füllstands und die Position des LTC-Sensors im Headspace des Güllelagers verursacht.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Prozedur zur Festlegung der Zeitfenster, während der die Gülletemperaturen erfasst wurden. Der Sensor LTC2_No12 oben (gelbe Linie; Abbildung 3, links) schwankte während der ganzen Zeit stark und zeigte einen Tagesgang, der demjenigen der Temperatur im Headspace des Güllelagers und im Laufhof sowie der Umgebungstemperatur folgte (Abbildung 3, rechts oben). Dies bedeutet, dass dieser Sensor über die ganze Zeit nicht die Gülletemperatur erfasste. Der Sensor LTC2_No2 Mitte (grüne Linie) zeigte einen konstanten Verlauf bis zum 08.05 (angegeben als 05/08). Danach folgte ein starker Abfall der Temperatur, mit dem der Übergang des Sensors von der Gülle in die Luft einhergeht. Anschliessend zeigte LTC2_No2 Mitte die gleichen Schwankungen wie die Lufttemperaturen gemäss Abbildung 3, rechts oben.



Abbildung 3: Illustration zur Festlegung der Zeitfenster mit Messdaten der Gülletemperatur für den Zeitraum 04.05.2025 bis 13.05.2025 von Betrieb 11 (x-Achse). Grafik links: Anzeige der Gülletemperaturen durch die Sensoren Position unten (blaue Linie, LTC2_No3_unten), Position Mitte (grüne Linie, LTC2_No2_Mitte) und Position oben (gelbe Linie; LTC2_No12_oben). Beschriftungen in den entsprechenden Farben für die drei Sensoren. Die y-Achse gibt die Temperatur in °C an. Grafik rechts oben: Anzeige der Temperatur im Headspace des Güllelagers (grüne Linie), im Laufhof (gelbe Linie) und der Umgebung (orange Linie) gemessen mit S31-Sensoren. Grafik rechts unten: Distanz zur Gülleoberfläche (grüne Linie) gemäss Füllstandssensor.

In Abbildung 3, rechts unten vergrössert sich zum gleichen Zeitpunkt die vom Füllstandssensor gemessene Distanz zur Gülleoberfläche um ca. 1 m, was bestätigt, dass sich der

Füllstand des Lagers unterhalb die Position Mitte von (1.5 m ab Boden Güllelager) abgesenkt hatte. Der Sensor LTC2_No3 unten (blaue Linie) zeigte einen konstanten Verlauf bis vor dem 10.05. Danach folgte eine kurze Phase von leichten Temperaturschwankungen. Hier ist unklar, ob der Sensor in die Gülle eingetaucht war oder nicht. Die Temperatur im Headspace des Güllelagers (Abbildung 3, rechts oben) zeigte parallel dazu ähnlich grosse Schwankungen, was eher auf eine Position des LTC2_No3 ausserhalb der Gülle hinweist. Auf den 10.05. nahm die Distanz zwischen Füllstandssensor und Gülleoberfläche nochmals um ca. 0.5 m zu (Abbildung 3, rechts unten). Ab diesem Zeitpunkt folgte die angezeigte Temperatur von LTC2_No3 unten den beiden anderen Sensoren, die sich bereits im Headspace des Güllelagers befanden, sowie den Lufttemperaturen gemessen mit den S31-Sensoren, womit auch LTC2_No3 unten die Gülletemperatur nicht mehr erfasste. Anhang 2 zeigt die Zeitfenster für die Bestimmung der Gülletemperaturen wie oben beschrieben.

2.6 Periodische Temperaturmessungen mit mobilen Geräten

2.6.1 Durchführung der Temperaturmessungen

Periodische Messungen der Gülletemperatur wurden auf den Betrieben 1, 6 und 10 (Testphase 2024) sowie 11 und 12 (Messkampagne 2024, 2025, 2026) zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen durchgeführt. Dabei erfolgte die Erfassung der Gülletemperatur im gleichen Lager an 3 bis 5 Messpositionen je in einer Tiefe von ca. 50 cm Abstand vom Boden, in ca. der Mitte der Füllhöhe und ca. 20 cm unterhalb der Gülleoberfläche. Die Reihenfolge der Temperaturmessung war jeweils unten, Mitte, oben. Zusätzlich wurde in einem weiteren auf den Betrieben 11 und 12 vorhandenen Lager Gülletemperaturmessungen durchgeführt. Auf den übrigen Betrieben erfolgten 2025 bis 2026 ausschliesslich periodische Messungen der Gülletemperatur. Während der Zeit der Temperaturmessung wurde ebenfalls die Umgebungstemperatur erfasst. Zur Messung der Gülletemperatur wurden die Sensoren des Typs LTC2 (Testphase 2024) und TC01 (Messkampagne 2024-2026) verwendet, die an einer Sonde (Durchmesser: 20 mm; Länge 4 bis 6 zusammenschraubbare Elemente aus Aluminium von je 1 m Länge) befestigt wurde (Abbildung 4, rechts). Die Sonde war mit seitlich aus dem Stab herausragenden Schrauben als Markierungen im Abstand von 0.5 m ausgestattet. Die Messung der Umgebungstemperatur erfolgte mittels Geräts S31, das in der Nähe des Güllelagers an einer schattigen Stelle platziert wurde.



Abbildung 4: Periodische Messung der Gülletemperatur mittels der mobilen Messsonde: links: in Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung; Mitte Güllesilo ungedeckt. Rechts: die Sonde auseinandergeschraubt für den Transport.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Vorgehen bei der Temperaurmessung. Die Position der Messpunkte auf den Betrieben ist in Anhang 3 aufgeführt. Die Anzahl Messungen sowie der Zeitraum der periodischen Messungen sind in Tabelle 2 angegeben.

Insgesamt wurden auf 11 Betrieben periodische Messungen durchgeführt. Davon erfolgten zwei in den Behältern mit kontinuierlichen Messungen sowie bei je einem weiteren Lager von Betrieb 11 bzw. 12. Auf diesen beiden Betrieben resultierten Daten von 13 bis 24 periodischen Messungen über alle Jahreszeiten. Auf 9 Betrieben wurden 8 bis 14 Messungen durchgeführt, welche die Jahreszeiten Sommer, Herbst, Winter umfassten. Davon wurde auf 7 Betrieben zusätzlich die Jahreszeit Frühjahr abgedeckt. Insgesamt erfolgten Messungen in 19 Behältern. Auf Betrieb 12 wurde zudem die Gülletemperatur in einem mit Spalten abgedeckten Kanal von rund 1.5 m Breite und 1 m Tiefe entlang der Fressachse gemessen (15 Messungen über alle Jahreszeiten). Weitere Informationen zu den Anzahl Messungen sowie der Zeitraum der periodischen Messungen auf den einzelnen Betrieben sind in der Tabelle 2 angegeben. Eine Beschreibung der Güllelager mit den wichtigsten Merkmalen des Produktionssystems bzw. der Tierhaltung ist in Tabelle 3 aufgeführt.

2.6.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der periodischen Temperaturmessungen erfolgte mit der Software R (Version 4.5.1). Zur Analyse der Einflussfaktoren auf die Gülletemperatur wurde ein gemischtes lineares Regressionsmodell implementiert. Dabei wurde die Temperatur als abhängige Variable definiert. Als fixe Effekte gingen die Faktoren Messposition, Tiefe und Lagertyp sowie geglättete Funktionen für den Kalendertag (doy) und die Tageszeit (Zeit3) in das Modell ein. Zusätzlich wurden zufällige Effekte für die Betriebe sowie für einzelne Messungen berücksichtigt. Das verwendete Modell lautete:

$$Wert_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Tiefe_{ij} + \beta_2 Messposition_{ij} + \beta_3 Lagertyp_{ij} + f_1(doy_{ij}) + f_2\left(Zeit3_{ij}\right) + \mu_{0j} + \mu_{1j} Messposition_{ij} + \vartheta_k + \varepsilon_{ij}$$

wobei

- $f_1(\cdot)$und $f_2(\cdot)$die glatten Splines (s(doy) und s(Zeit3)) darstellen,
- u_{0j}der zufällige Interzept für Betrieb j ist,
- u_{1j}die betriebsspezifische Abweichung des Effekts von Messposition darstellt,
- $v_k$der zufällige Interzept für Messung k ist.

Eine Überprüfung der Modellannahmen erfolgte anhand graphischer Residuenanalysen. Hierzu wurden Histogramme sowie Quantil-Quantil-Diagramme der Residuen erstellt. Zusätzlich erfolgte eine posterior-prädiktive Modellkontrolle (pp_check) zur Beurteilung der Modellanpassung. Die Konvergenz der Bayes'schen Modelle wurde anhand der Rhat-Werte kontrolliert.

Zur Untersuchung der zufälligen Effekte wurden die posterioren Ziehungen der Betriebs- und Messungseffekte extrahiert und auf ihre Verteilung geprüft. Effektgrafiken für die kontinuierlichen Einflussgrössen Kalendertag und Tageszeit wurden mittels conditional_effects() erstellt und graphisch dargestellt. Für kategoriale Variablen wie Messposition und Tiefe wurden geschätzte Mittelwerte mit zugehörigen Vertrauensintervallen visualisiert.

Tabelle 3: Charakterisierung der Güllelager sowie des Produktionssystems bzw. der Tierhaltung, welche die Gülleeigenschaften beeinflussen können. B: Betriebsnummer; L: Nummer des Lagers je Betrieb; Typ Güllelager, Volumen (m^3) und Tiefe (m) des Güllelagers; Rühr: Anzahl Rührvorgänge pro Jahr; Verd: Verdünnung der Gülle; Tierkategorie: Tierkategorie, welche die Gülle produziert; Stallsystem; Tiere: Anzahl Tiere pro Stall; Baujahr: Baujahr des Stalls; Wärmed: Wärmedämmung der Bauhülle des Stalls; Laufflächen: Laufflächen von Stall und Laufhof: Fr: Fressgang, Lg: Laufgang zu den Liegeboxen, LH: Laufhof, planbef.: planbefestigt, perf.: perforiert; Entmistung: Entmistungssystem (EntSchieber: Entmistungsschieber; mobil: Entmistung von Hand oder maschinell mit Schieber oder Räumschild; ; H.-Entm.: Häufigkeit der Entmistung pro Tag; Laufhof: in den Stall integriert oder angrenzend an Stall; Einstreu: verwendeter Typ Einstreumaterialien; Fütterung: TMR: Totalmischration; Wt Jahr: Anzahl Weidetage pro Jahr; Wh Tag: Weidestunden pro Tag.

B	L	Typ Güllelager*	Volumen	Tiefe **	Rühr	Verd	Tierkategorie	Tiere	Stallsystem##	Baujahr	Wärmed	Laufflächen###	Entmistung	H.-Entm.	Laufhof	Liegeboxen	Einstreu	Fütterung	Wt Jahr	Wh Tag
1	1	u_L_per	1050	3.5	8#	1.5:1	Milchkühe	62	Boxenlaufstall/EG	2015	ja	Fr:planbef. LH: perf.	EntSchieber/mobil	2	Integriert LG Liegeboxen	Tiefboxen	Strohhäcksel	TMR	200	3
2	1	Unt_fe	168	2.5	26	1:1	Milchkühe	30	Boxenlaufstall; Liegeboxen im Freien/MG	2011	nein	planbefestigt	mobil/ manuell	1-2	An Stall angrenzend	Tiefboxen	Strohhäcksel	Heu, (silofrei)	230	14
	2	u_L_per	340	3.0	12	1:1	Schweine/ Aufzuchtrinder/Galtkühe	300/ 10	Labelstall; Boxenlaufstall im Freien/MG	2005	ja	Teilspalten Perforiert	mobil/ manuell	1 Mal/ Woche	Endlager von Lager 1 und 2	Tiefboxen			230	14
	3	Silo_un_E	600	3.0	4#	1:1	Endlager von Lager L1		vgl. oben	2005		planbefestigt		-	Endlager von Lager 1 und 2				vgl. oben	
3	1	Unt_fe	200	2.0	10	1:2	Mutterkühe Mutterkukälber	12 12	Liegeboxen Tiefstreu/EG	Vor 1990;	nein	planbefestigt	Manuell	2	An Stall angrenzend	Tief	Strohhäcksel	Dürrfutter/ Silage	210	9
4	1	Silo_un_B	750	3.7	6-8	1:1	Galtsauen	Total 110 GVE	Labelstall mit Auslauf	2004	ja	Teilspalten; Auslauf Galtsauen planbef.	Fn	Fn	-	-	Strohhäcksel	Fn	-	-
	2	Vorg_Unt_fe	230	2.3	10	1:<1	Säugende Sauen, Absetzferkel		Geschlossener Stall						-	-			-	-
5	1	u_L_per	420	2.5	Ca. 70	1:1	Milchkühe/ Aufzuchtrinder	46	Boxenlaufstall/EG	1999	nein	Fr, Lg: planbef. LH: perf.	Stall: EntSchieber LH: mobil	4	An Stall angrenzend	Tiefboxen	Strohhäcksel	TMR	180	4
6	1	Silo_un_B	1000	4.0	12	1:<1	Gärgülle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	Unt_fe	363	2.4	12	1:1	Masttiere Vormast	45	Nicht struktiuerte Liegefläche/EG	vor 1990	nein	Fr, Lg, LH: planbef.	mobil/manuell	1	An Stall angrenzend	-	Kurzstroh	TMR	220	>18
7	1	Unt_fe	650	4.0	365	1:1	Milchkühe Aufzuchtrinder	56 15	Boxenlaufstall/MG	1994	nein	planbefestigt	EntSchieber /mobil	2-8	An Stall angrenzend	Tiefboxen	Kurzstroh	TMR	200	3-4
8	1	u_L_per	750	2.6	ca. 175	1:1	Milchkühe	43	Boxenlaufstall/EG	2016	ja	Fr: perf, Lg: planbef. LH: perf.	EntSchieber /mobil	6	An Stall angrenzend	Tiefboxen	Strohhäcksel	TMR Gras	200	8.5

Temperatur von Gülle während der Lagerung

B	L	Typ Güllelager*	Volumen	Tiefe **	Rühr	Verd	Tierkategorie	Tiere	Stallsystem##	Baujahr	Wärmed	Laufflächen###	Entmistung	H.-Entm.	Laufhof	Liegeboxen	Einstreu	Fütterung	Wt Jahr	Wh Tag
9	1	Vorg_Unt_fe	60	3	100	1:<1	70 Milchkühe 9 Aufzuchtrinder >2jährig	79	Boxenlaufstall/EG	2007	nein	Planbefestigt Gummimatten	EntSchieber	24	An Stall angrenzend	Tiefboxen	Langstroh	TMR	210	2
	2	Silo_un_E	1159	4.5	5-7	1:1														
10	1	u_L_per	880	4	12	1:<1	Milchkühe	62	Boxenlaufstall/EG	1998	nein	perforiert	Roboter	10	An Stall angrenzend	Tiefboxen	Strohhäcksel	TMR	0	0
11	1	u_L_per	480	2.8	~140	1.2-1.5	Milchkühe Aufzuchtrinder <1 -jährig	62 8 GVE	Boxenlaufstall/MG	2018	ja	Fr,LH: perf; Lg: planbefestigt	Roboter	6-12	Integriert Fressachse	Tiefboxen	Strohhäcksel	TMR	230	8-12
	2	Unt_fe	500	3.8	~15	1.5														
12	1	Silo_Ze_B	550	3.0	5	ca. 1:1	Milchkühe	50	Boxenlaufstall/MG	1994	nein	planbefestigt	EntSchieber/mobil	8 / 2	Integriert Fressachse	Tiefboxen	Strohhäcksel	TMR	210	3-4
	2	Vorg_Unt_fe	150	4	9															
	3	Kanal_per	120	1	0															

*Legende Typ Güllelager
Kanal_per: Kanal mit perforierter Abdeckung
Silo_B_un: Silo, Material: Beton, ungedeckt
Silo_B_Ze: Silo, Material: Beton, mit Zeltabdeckung
Silo_E_un: Silo, Material: Email, ungedeckt
u_L_per: Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung;
Unt_fe: Unterflurlager mit fester Abdeckung
Vorg_Unt_fe: Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung
**Tiefe insgesamt: bei Silo: Gesamttiefe/Tiefe unterhalb der Oberfläche
#nur beim Ausbringen
##EG: Eingebäudelaufstall; MG: Mehrgebäudelaufstall
###Fr: Fressachse; Lg: Laufgang zwischen Liegeboxenreihen und Quergänge

Weitere Fussnoten:

Betrieb 2:
L1: Typ Güllelager: Decke des Lagers ist Teil der Oberfläche des Laufhofs
Stallsystem L1: Boxenlaufstall/Mehrgebäudelaufstall: Futter- und Fressachse im alten, ursprünglichen Anbindestall (Gebäude nördlich von L1 auf Abbildung 'Temperaturmessung Betrieb 2' in Anhang 3, gedeckte Liegeboxenreihen im Aussenbereich südlich angrenzend an den alten, ursprünglichen Anbindestall. Dazwischen liegt der Laufhof (auf Decke des Lagers L1) und die Laufgänge zwischen den Liegeboxen. Laufhof und Laufgänge sind nicht überdacht.
Baujahr: Umbau zum Laufstall und Erweiterung mit Aussenbereich mit Laufhof und Liegeboxen: 2011. Der alte ursprüngliche Anbindestall datiert von 1900 oder früher.

Betrieb 3:
Rühr: 1 Mal pro Monal von Beginn November bis Ende Februar, von Beginn März bis Ende Oktober: bei der Ausbringung von Gülle, d.h. ca. alle 6 Wochen
Verd: während Weidesaison starke Verdünnung wegen Weide
Baujahr: umgebauter Anbindestall in Berner Bauernhaus; Umbau: 2012
Laufflächen: 2 Schwemmkanäle des ehemaligen Anbindestalls sind noch vorhanden. Schwemmkanäle sind mit Schiebern gegen das Güllelager abgetrennt. Diese werden ausserhalb der Weidesaison alle 2 Wochen angehoben und die Schwemmkanäle entleert. Während Weidesaison ist keine Entleerung nötig.
Einstreu: Strohhäcksel in Liegeboxen; Langstroh Tiefstreu

Temperatur von Gülle während der Lagerung

Betrieb 4
Rühr:L1: nur beim Ausbringen von Gülle während der Vegetationszeit; L2: alle 5 Wochen, wenn Gülle von der Vorgrube in den Silo gepumpt wird.
Stallsystem: überall Einstreuen von Strohhäcksel; Galtsauen: Liegefläche als Tiefstreu mit Langstroh, die 4-5 Mal pro Jahr ausgemistet wird.
Entmistung, Häufigkeit der Entmistung: Auslauf Labelstall der Galtsauen: 2 Mal pro Tag mit Entmistungsschieber; Leerung Kanäle Ställe der Galtsauen und säugenden Sauen: 1 Mal pro Woche; Leerung Kanäle Absetzferkel. 2 Mal pro Woche
Fütterung: Feuchtsilage Körnermais, Futterweizen, Gerste, Soja, Kartoffelprotein, sythetische Aminosäuren, Mineralstoffe (Selbstmischer; Futtergetriede vom eigenen Betrieb)

Betrieb 5:
Rühr: im Winter alle 2-3 Wochen, während Vegetationszeit: jeweils bei Ausbringen von Gülle bzw. alle 4-6 Wochen
Tiere: Total 46 GVE, davon 38 Kühe, 8 GVE Aufzuchtrinder
Wärmed: Wände aus Holz, Dach: Eternit und PV Panels; deckenlastiges Lager

Betrieb 6
L1: Tierkategorie: die Gärgülle stammt von einer Biogasanlage, welche flüssige und feste Hofdünger von verschiedenen Betrieben zusammenführt (u.a. von Betrieb 6) und die Gärgülle anschliessend wieder auf die Lieferbetriebe verteilt
L2: 1 bis 2 Mal pro Monat wird die Gülle in eine Biogasanlage abgeführt. Der Füllstand war dementsprechend niedrig (Mittelwert: 0.6 m, max.: 1.15 m).

Betrieb 7
Stallsystem: Mehrgebäudestall mit zentraler Futterachse im Gebäude Nord (Abbildung 'Temperaturmessung Betrieb 7' in Anhang 3); nördlich davon Stall für Aufzuchttiere und Galtkühe mit planbefestiger Fläche an Fressachse und nicht strukturierter eingestreuter Liegefläche; südlich davon: Fressachse für die laktierenden Milchkühe. Gebäude südlich: 2 Liegeboxenreihen für laktierende Milchkühe.
Entmistung, Häufigkeit der Entmistung: Fressachse laktierende Milchkühe, Galtkühe und Aufzuchtrinder: 2 Mal pro Tag mit Entmistungsschieber; Laufgang zwischen Liegeboxen laktierende Milchkühe: 8 Mal pro Tag mit Entmistungsschieber. Laufhof: 2 Mal pro Tag manuell.
Einstreu: 3-4 Mal pro Jahr: Herstellung Kalkstrohmischung mit Kurzstroh und Kalk; dazwischen: Nachstreuen von Kurzstroh manuell.

Betrieb 8
Rühr: im Winter alle 2 Tage während 10 Minuten; während Vegetationszeit: jeweils bei Ausbringen von Gülle bzw. 8-9 Mal
Laufflächen: AMCO Boden entlang Fressachse
Fütterung: Eingrasen während Vegetationszeit

Betrieb 9:
L1,L2: Zugabe von Meeralgenkalk zu besseren Rotte, Vermeidung von Schwimmschicht und weniger Geruch.
Rühr: L1: Rührwerk alle 2 bis 3 Tage in Betrieb während Leerung Querkanal in Vorgrube; L2 im Sommer alle 6-7 Wochen
Verd.: im Sommer Zugabe von Wasser zur Verdünnung
Laufhof: Entmistung von Hand 2 Mal pro Tag

Betrieb 10:
Stallsystem: eingentlich ein Eingebäudestall, jedoch mit einer gedeckte Liegeboxenreihe südlich und südöstlich angrenzend an den Laufhof (in Abbildung 'Temperaturmessung Betrieb 10' in Anhang 3 nur die südliche Liegeboxenreihe sichtbar).

Temperatur von Gülle während der Lagerung

Betrieb 11
Volumen: Das Güllelager unter dem Laufhof hat ein Volumen von total ca. 1000 m^3 getrennt. Das untersuchte Lager auf der Westseite ist abgetrennt durch eine Wand und mit dem Lager auf der Ostseite mit einem Schieber verbunden, durch welchen die Gülle in Richtung Endlager befördert wird. Zur Ausbringung wird hauptsächlich Gülle aus dem Endlager entnommen, teilweise aber auch aus dem untersuchten Lager.
Rühr: Im Winter: Betrieb Haselrührwerk alle 4-6 Tage; im Sommer ca. 1 Mal pro Woche. Die Häufigkeit des Aufrührens richtet sich nach der Absicherung des Rührwerks. Bei zu grossem Widerstand lässt sich das Rührwerk nicht starten. Daher muss häufig aufgerührt werden, um eine ausgeprägt Schwimmschichtbildung zu verhindern.
Verd L1: Schweinegülle und Abwasser von Aquakultur aus Versuchstätigkeiten plus Brauchwasser zur Spülung der Rohrleitungen. Die Gülle stammt zum grössten Teil von den Milchkühen
Verd L2: wie L1 plus Wasser von Maschinenwaschplatz
Stallsystem: Milchkühe Boxenlaufstall; Aufzuchtrinder <1 -jährig: Fressachse planbefestigt, Liegebereich: Tiefstreu.
Tiere: 62 Milchkühe, ca. 30 bzw. 8 GVE Aufzuchtrinder <1 jährig; zusätzlich wird Schweinegülle und Abwasser aus Aquakultur von Versuchstätigkeiten eingeleitet
Entmistung: Roboter 10 Routen unterteilt
Perf Boden mind. 2 Mal pro Tag
Feste Böden 6-7 Tage; April bis Ende Nov. Mit Wasser; pro Route 40 L Wasser
Wärmed: Seite Süd und Tore in Richtung Nord mit Curtains, die im Sommer nach Bedarf geöffnet werden können. Sehr gutes und im Sommer tendenziell kühles Stallklima gemäss Einschätzung des Betriebsleiters.
Einstreu: 1 Mal pro Woche Zugabe von Kalk (Verbrauch 80 kg pro Woche); Produkt: Desical® (Dolomitkalk (Calciummagnesiumdioxid, $CaMgO_2$; Calciummagnesiumtetrahydroxid, $CaMg(OH)_4$)
Wt Jahr: 70% der TS-Aufnahme auf Weide während der Vegetationszeit

Betrieb 12
Rühr: L1: bei jeder Ausbringung; L2: jeweils beim Umpumpen von der Vorgrube in den Silo
Verd: im Sommer auch Einleitung von Dachwasser in Gülle
Laufflächen: planbefestigt; entlang Fressachse ein Kanal mit perforierter Abdeckung, von ca. 1.5 m Breite
H.-Entmistung: Laufgang zwischen Liegeboxen: alle 3 Stunden; Laufhof, Bereich Fressachse: 2 Mal pro Tag manuell
Einstreu: 1 Mal pro Woche Zugabe von Kalk, Produkt: Desical®; (vgl. Informationen zum Produkt unter Fussnote von Betrieb 11)

2.7 Quervergleiche der Messgeräte

Insgesamt wurden bei den Messungen 8, 3 bzw. 8 unterschiedliche Geräte der Typen LTC2, TC01 bzw. S31 eingesetzt. Da nicht sichergestellt ist, dass die Geräte exakt die gleiche Temperatur messen, ist ein Quervergleich erforderlich. Dazu wurden im Verlauf der Messkampagnen testweise mehrere Vergleichskampagnen durchgeführt, die in der Regel kleine Abweichungen gezeigt hatten. Systematische Quervergleiche erfolgten zwischen 07.06 2024 bis 06.07.2024 (i) und 09.02.2026 bis 17.02.2026 (ii) sowie 17.02.2026 bis 24.02.2026 (iii). Die Kampagne (i) von 2024 erfolgte für LTC2 und S31 Sensoren unter nicht kontrollierten Bedingungen in einem nicht wärmegedämmten Aussenlager mittels Messung der Umgebungsluft. Für die beiden Kampagnen im Februar 2026 wurde ein Inkubator verwendet (Binder KB ECO 720, BINDER GmbH, Deutschland), wobei in Kampagne (ii) sämtliche Geräte (LTC2, S31 und TC01) in der Luft und in Kampagne (iii) die Typen LTC2 und TC01 in Wasser exponiert wurden.

Bei Kampagne i) wurden die Messwerte der eingesetzten Sensoren gemittelt und die Abweichungen der einzelnen Sensoren auf den Mittelwert korrigiert. Die Durchführung der Kampagne (ii) umfasste den Temperaturbereich zwischen -10˚C und 40˚C gemäss Einstellung des Inkubators, wobei die effektiv erreichte Minimaltemperatur -6˚C betrug. Anschliessend erfolgte die Einstellung von 5 Temperaturstufen gegen oben auf 0˚C, 10˚C, 20˚C, 30˚C sowie 40˚C und anschliessend die gleichen 5 Temperaturstufen gegen unten. Der Temperaturwechsel von einer Stufe zur nächsten dauerte jeweils 1 h. Die Einstellung der Temperatur erfolgte mit der Einstellung des Thermostats des Inkubators und wurde zusätzlich durch ein Multimeter (DMM6500, Keithley, USA; Genauigkeit ±0.3 ˚C) gemessen.

Die Durchführung der Kampagne (iii) umfasste den Temperaturbereich von 5˚C bis 25˚C, wobei die Geräte in einem Gefäss mit 1 L Wasser im Inkubator exponiert wurden. Das Wasser wurde mit einem Rührgerät (Topolino, IKA, Deutschland) kontinuierlich homogenisiert. Der Start erfolgte bei 25˚C und Einstellung von 4 Temperaturstufen gegen unten von 20˚C, 15˚C, 10˚C sowie 5˚C und anschliessend die gleichen 4 Temperaturstufen gegen oben. Die eingestellte Temperatur wurde während 17h konstant gehalten.

Für die Kalibration aller Sensoren wurde die Kampagne (ii) verwendet. Sensoren welche zum Zeitpunkt der Kampagne (ii) nicht verfügbar waren, wurden via Kampagne (i) auf die restlichen Sensoren abgeglichen. In Kampagne (ii) wurden Messwerte pro Temperaturstufe für jeden Sensor gemittelt, sobald die Messungen aller Sensoren konstante Werte zeigten. Danach wurden die Sensoren anhand einer linearen Regression der Stufenmittelwerte auf die gemittelte Referenzmessung, auf die Referenzmessung abgeglichen. Die Referenzmessung bestand aus der Inkubator-Messung, welche auf den Mittelwert, bestehend aus der Inkubatormessung und den beiden Multimetermessungen, abgeglichen wurde.

Zur Kontrolle aller korrigierter Sensoren wurde die Kampagne (iii) mit den korrigierten Sensorwerten in Wasser verwendet.

Nach Abschluss von Kampagne (iii) erfolgte vom 05.03.2026 bis 13.08.2026 während 23 Wochen ein weiterer Quervergleich der Sensoren unter nicht kontrollierten Bedingungen in einem nicht wärmegedämmten Aussenlager, bei dem die Temperatur der Umgebungsluft gemessen wurde (Kampagne iv). Dabei wurde überprüft, ob und inwieweit über die Zeit ein Drift der Temperaturmessung zwischen den Sensoren erfolgt. In Kampagne (iv) konnten nicht alle in den Kampagnen (i) bis (iii) verwendeten Sensoren eingesetzt werden.

Nach Unterteilung der ganzen Messdauer in Perioden von einer Woche wurden über jede Woche in einer Auflösung von 1 Minute Mittelwerte der Sensoren LTC2 No 3,4,5,6,7 berechnet. Danach erfolgte die Berechnung der Abweichung der Messwerte aller einzelnen Sensoren von diesen Mittelwerten ebenfalls in einer Auflösung von 1 Minute. Alle

1 Minutenwerte wurden mit den Korrekturfaktoren aus Kampagne (ii) korrigiert. Anschliessend erfolgte eine Aggregierung dieser Abweichungen auf ein Wochen Mittelwerte.

2.8 Schätzung der Methanemissionen basierend auf der Lufttemperatur und der gemessenen Gülletemperatur

Zur Modellierung von Methanemissionen wird üblicherweise die Van't Hoff-Arrhenius Gleichung verwendet. Ein Beispiel dafür ist die Methodik von Mangino et al. (2001) (VanderZaag et al., 2026). Studien im Pilotmassstab geben einen Wert von 15°C an, ab welchem wesentliche Methanemissionen auftreten (Cardenas et al., 2021). Im Praxismassstab fanden Balde et al. (2016b) vernachlässigbare Emissionen bei weniger als 15°C und einen linearen Anstieg oberhalb dieses Temperaturwerts.

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, welchen Einfluss die Verwendung der Gülletemperatur anstelle der Lufttemperatur auf die mit dem Modell von Mangino et al. (2001) berechnete Methanemissionen hat. Dies erfolgte für die Lager der Betriebe 11 und 12 basierend auf den kontinuierlich gemessenen Daten. Die Schätzung der Menge vorhandener abbaubarer organischer Trockensubstanz (Volatile Solids, VS) erfolgte mittels des Normwerts für organische Substanz (OS) von Rindviehgülle von 70 kg pro m^3, des Anfalls unverdünnter Vollgülle von 23 m^3 pro Milchkuh gemäss Richner et al. (2017) und der Anzahl der Milchkühe (Tabelle 3). Die Gülle von Aufzuchtrindern wurde in Grossvieheinheiten (GVE) umgerechnet und für den Anfall von Vollgülle einer GVE Aufzuchtrinder eine Menge von 23 m^3 wie für Milchkühe angenommen. Die Verteilung der Güllemenge auf jeden Monat des Jahres 2025 erfolgte basierend auf dem mittleren gemessenen Füllstand pro Monat und der Oberfläche der Güllelager sowie einer Korrektur für die geschätzten Gülleverdünnung. Diese Korrektur wurde von der Niederschlagssumme pro Monat dividiert durch die Jahresniederschlagsmenge hergeleitet (Niederschlagsmengen gemäss Daten der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen[3]).

Die in der Berechnung verwendete Lufttemperatur stammt von der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen. Die Gülletemperatur basiert auf den gewichteten Messwerten der Sensoren unten und Mitte gemäss Tabelle 4.

[3] https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/messwerte.html#param=messwerte-niederschlag-10min&table=false&station=BER&chart=month (20.04.2026)

3. Resultate und Diskussion

3.1 Betrieb der Messgeräte

3.1.1 Kontinuierliche Messungen

3.1.1.1 Installation der Messgeräte im Güllelager

In einem ersten Schritt wurde in der Testphase versucht, die Temperatursensoren direkt in die Gülle einzuführen. Dies mit dem Ziel, das Kabel ohne Entfernung eines Gitterrosts durch dessen Öffnungen in das Güllelager einbringen zu können. Ebenso liessen sich kleine Öffnungen (z.B. Durchmesser von weniger als 10 cm) in der Decke eines Lagers nutzen. Dieses Vorgehen bewährte sich jedoch nicht, da der Sensor an der Oberfläche der Gülle liegen blieb. In einem zweiten Schritt wurden die Kabel der Sensoren an einer Rundstahlkette fixiert und anschliessend mit der Kette zusammen in das Güllelager abgesenkt oder mit einem Stab in die Gülle gedrückt. Es zeigte sich jedoch, dass sich die Kette auch auf diese Art nicht in der gewünschten Tiefe platzieren liess und nach einer gewissen Zeit wieder auf der Gülleoberfläche aufschwamm (vgl. Anhang 4). Anschliessend wurde am unteren Ende der Kette ein Rasengitter- oder Kalksandstein fixiert, um ein Aufschwimmen von Kette und Messsensoren zu verhindern. Ein Gewicht von 6-7 kg zur Beschwerung der Kette, was einem Kalksandstein 25x12x14 cm oder 25x14.5x14 cm entspricht, erwies sich als optimal zur Fixierung der Kette am Boden von Güllelagern. Ein Gewicht von mehr als 10 kg (z.B. Rasengitterstein) war wenig praktikabel, z.B. bei der Entnahme der Einrichtung aus einem Silo, da zu schwer und zu sperrig. Trotz Gewicht musste die Einrichtung bei einer Neuinstallation häufig mittels eines Stabs durch die Schwimmschicht in die Gülle gedrückt werden.

Auf einem Betrieb riss das Kabel zwischen dem Temperatursensor und dem Elektronikgehäuse mehrmals. Die Ursachen waren nicht vollständig klar. Unsorgfältiges Entfernen des Gitterrosts oder Nicht-Entfernen der Messeinrichtung aus dem Güllelager bei Betrieb des Rührwerks sind mögliche Ursachen. Mittels Führung der Kabel durch einen Schlauch liess sich dieses Problem in der Folge beheben. Abbildung 2 zeigt eine Anordnung der Messgeräte, die auf den Betrieben 11 und 12 für die kontinuierlichen Messungen eingesetzt wurde und sich bewährt hatte.

Die gewählte Messanordnung erhöhte den Arbeitsaufwand und erforderte aus Sicherheitsgründen den Einsatz von mindestens 2 Personen. Eine weitere Konsequenz daraus war, dass mit dem Gewicht und der Kette Gegenstände eingeführt wurden, welche bei einer Fehlmanipulation in das Lager gelangen und dadurch potenziell grossen Schaden an Pumpen oder Rührwerken anrichten konnten. Dies implizierte weiter, dass es nicht möglich war, die Gülletemperatur bei Silos in einem genügend grossen Abstand von den Wänden der Lagerbehälter zu messen. Die Platzierung in der Mitte eines Güllelagers, was aus Sicht der Repräsentativität einer Messstelle für den Gesamtinhalt des Lagers wünschbar wäre, liess sich nicht umsetzen bzw. wäre nur mit einem grossen Aufwand, wie Anheben von Betonrosten mit einem Gewicht in der Grössenordnung 500 kg mittels Hoflader oder Installation eines Tragseils quer über einen ungedeckten Silo umsetzbar gewesen.

Die Messanordnung führte auch dazu, dass die für die kontinuierlichen Messungen gewählte Position im Hinblick auf die Generierung von repräsentativen Messwerten grundsätzlich ungünstig war. Im Berich der Öffnung von Betrieb 11 befand sich ein Wasseranschluss, wodurch im Bereich der Temperatursensoren grössere Mengen Wasser in das Güllelager gelangen konnte (z.B. durch Waschen von Stiefeln und anderen Gegenständen, u.a. auch im Rahmen von Übungen von ganzen Klassen Auszubildender der benachbarten landwirtschaftlichen Schule). Bei Betrieb 12 befand sich der Temperatursensor in unmittelbarer Nähe zur Silowand.

3.1.1.2 Messgeräte im Dauerbetrieb

Die Messanordnung wie oben beschrieben bewährte sich auf den Betrieben 11 und 12 im Dauerbetrieb. Auf beiden Betrieben gab es keine grösseren Störungen oder Vorfälle wie Verlust von Geräten, Reissen der Kette o.ä. Dabei ist anzumerken, dass die Messgeräte rauen Bedingungen ausgesetzt waren: aggressive Gase im Headspace der Güllelager, Benetzung der Messgeräte mit Wasser auf Betrieb 11, starke Kondenswasserbildung, insbesondere auf Betrieb 12 unter dem Zeltdach. Auf beiden Betrieben wurde die Messeinrichtung bei Durchmischung der Gülle nicht aus dem Behälter entfernt, wobei ein Axial-Rührwerk (Betrieb 11) und ein Tauchmotor-Rührwerk (Betrieb 12) zum Einsatz kam. Auf Betrieb 11 war das Rührwerk bis zu 2-Mal pro Woche in Betrieb und auf Betrieb 12 hauptsächlich bei Gülleausbringung bzw. rund alle 2 Monate. Bei Betrieb 11 lag die Messeinrichtung ca. 14 m von der Achse des Rührwerks entfernt. Die Turbulenz war damit im Bereich der Messeinrichtung eher klein. Bei Betrieb 12 betrug die Distanz zwischen Messeinrichtung und Rührwerk ebenfalls rund 14 m. Das Rührwerk war direkt auf die Messeinrichtung gerichtet. Dadurch wurde diese gegen die Behälterwand gedrückt, womit die Belastung auf die Kette aufgrund der Strömung wohl nicht übermässig gross war.

Auf Betrieb 11 musste ein Temperatursensor LTC2 wegen Defekts ausgewechselt werden. Auf Betrieb 12 betraf dies einen Temperatursensor S31 (Headspace Güllelager). Alle weiteren Geräte liefen durchgehend abgesehen von vereinzelten Perioden, in welchen die Batterie gewechselt werden musste.

3.1.2 Periodische Messungen

Die periodischen Messungen wurden in der Testphase mit einer Sonde mit 10 mm Durchmesser durchgeführt. Nach einem Bruch an einer Stelle unterhalb des Gewindes wurde diese durch eine Sonde mit 20 mm Durchmesser ersetzt. Aus Sicht der Stabilität der Sonde wäre ein noch grösserer Durchmesser wünschenswert. Beispielsweise war das Durchstechen einer gut ausgebildeten Schwimmschicht eine Herausforderung. Bei einzelnen Messungen wurde auf die Messung an gewissen Messpunkten verzichtet, da ein zu grosses Risiko eines Bruchs bestand. Dies vor allem bei tiefen Güllelagern, bei welchen alle 6 Elemente und damit die ganze Länge von 6 m erforderlich war, wodurch grosse seitliche Kräfte auf die Sonde einwirkten. Teilweise war es möglich, mit einem anderen, stabileren Gerät eine Öffnung in die Schwimmschicht zu stechen, durch welche die Sonde anschliessend eingeführt werden konnte.

Allerdings wäre die Sonde mit einem grösseren Durchmesser nicht anwendbar aufgrund der Spaltenweite von 30-35 mm bei unter dem Laufhof gelegenen Güllelagern. Weiter wirkt auch das Gewicht der Sonde auf ihre Anwendbarkeit aus, besonders dann, wenn die ganze Länge von 6 m benötigt wird. Dies spricht auch gegen die Verwendung von stabileren Materialien wie z.B. Chromstahl.

Bei der Messung der Temperaturen in den Güllelagern liess sich der unterste Messpunkt (ca. 50 cm Abstand vom Boden) zuverlässig treffen. Da sich jedoch der Füllstand bei Lagern unter einem Laufhof mit perforierter und teilweise mit fester Abdeckung nicht immer eindeutig feststellen liess, war die Erkennung der Mitte und das Niveau oben (ca. 20 cm unterhalb der Gülleoberfläche) nicht zuverlässig gegeben[4]. Demzufolge waren die Messpunkte ‘Mitte’ und ‘oben’ in den Güllelagern variabel, was Auswirkungen auf die gemessene Temperatur haben kann. Dies betrifft die Lager 1/1, 2/1, 2/2, 3/1, 5/1, 8/1, 10/1,

[4] Bei Lagern mit Abdeckung, vor allem bei Lagern unter einem Laufhof mit perforierter Abdeckung, ist die Gülleoberfläche beim Einführen der Sonde nicht in jedem Fall sichtbar. Nur bei Vorliegen einer festen Schwimmschicht ist sie aufgrund des Widerstands auf die Sonde spürbar. Mittels Markierungen an der Sonde liess sich anschliessend abschätzen, in welcher Tiefe die Sonde platziert werden musste. Dieses Vorgehen ist jedoch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

11/1 (Tabelle 2). Für die übrigen Güllelager, namentlich für diejenigen ohne Abdeckung bestand dieses Problem und die damit verbundene Unsicherheit nicht.

In der Testphase wurde die nötige Messdauer an einem Punkt mittels Überwachung des Temperaturverlaufs der Sonde LTC2 auf einem Laptop festgelegt. Sobald die Temperatur konstant war, wurde zum nächsten Messpunkt gewechselt. Dies dauerte rund 1 bis 2 Minuten. Dadurch wurde der Zeitbedarf gross. Zwecks Minimierung der Messdauer wurde die Temperatur immer auf dem Bildschirm verfolgt und bei Erreichen der Temperaturkonstanz die Uhrzeit notiert. Dieses Vorgehen erwies sich als nicht praktikabel, da sich das Handling von Laptop und mit Gülle verschmutzter Messsonde gleichzeitig als sehr schwierig und umständlich erwies. Nach der Testphase wurde der relativ träge Sensor LTC2 durch das Modell TC01 ersetzt. Dieser erreicht eine Temperaturkonstanz nach ca. 10 Sekunden. Mittels Zählens von 1 bis 15 oder 1 bis 20, d.h. mit genügend Reserve, liess sich der Zeitpunkt der Temperaturkonstanz einfach und in kurzer Zeit festlegen. Mit der Einführung des Geräts WisNode LoRa Button 4K, das aus 5 Elementen mit je 4 Tasten, mit welchen sich auf Grafana ein Zeitstempel aufzeichnen lässt, war es möglich, den Zeitpunkt der gewünschten Temperaturmessung festzulegen. Die Datenübertragung während der periodischen Messungen erfolgte in den meisten Fällen zuverlässig.

3.2 Quervergleiche der Messgeräte

Abbildung 5 zeigt die Temperaturen der LTC2 Sensoren im Quervergleich der Kampagne (i), Luft. Die Grafiken zeigen sehr ähnliche Temperaturverläufe der einzelnen Sensoren. Die notwendige Korrektur für die einzelnen Sensoren war demnach klein. Diese Korrektur wurde nur verwendet für Geräte, die im Laufe der Messkampagne ausgefallen waren und nicht in den Kampagnen (ii) und (iii) überprüft werden konnten (LTC2-1; LTC2-12).

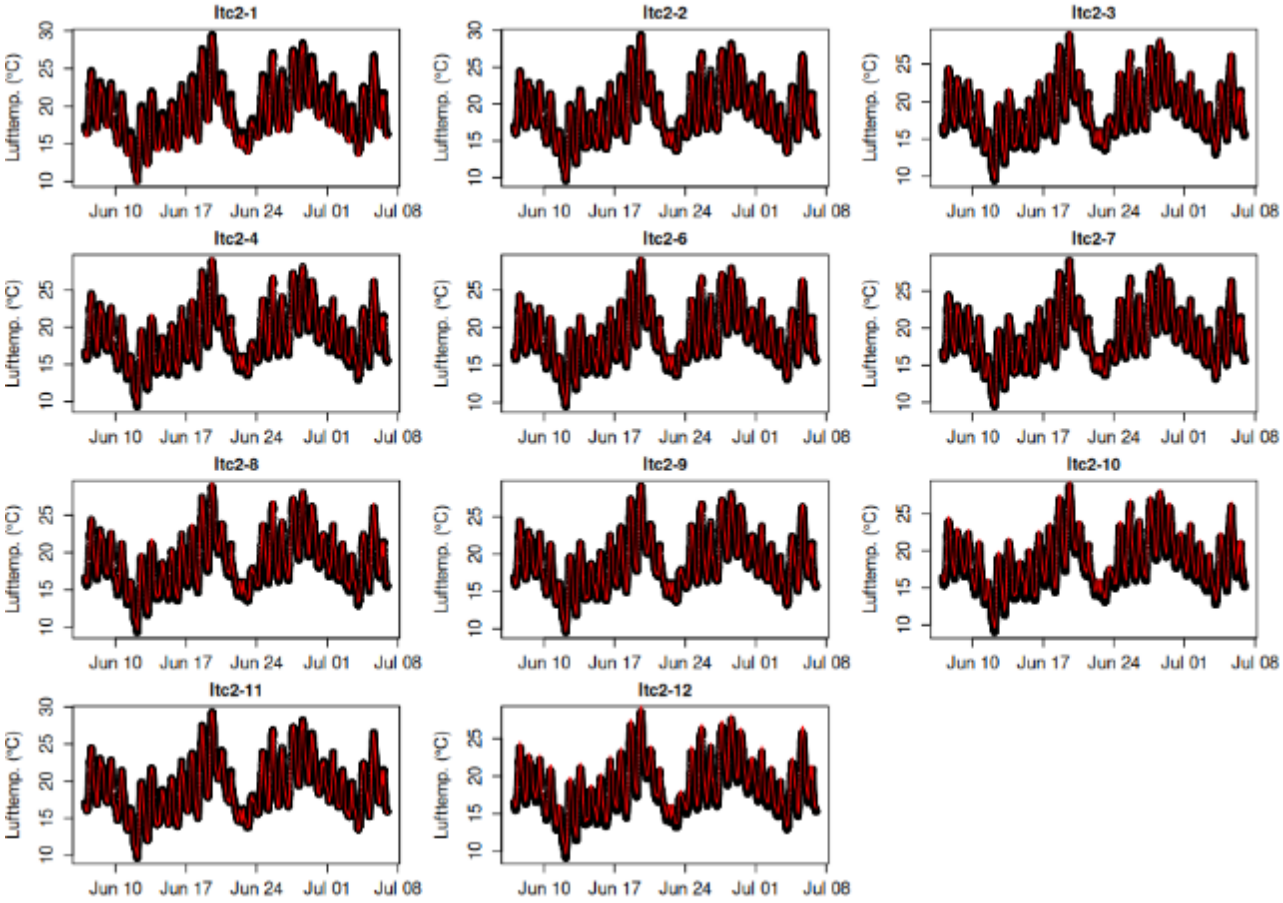


Abbildung 5: Temperaturen der LTC2 Sensoren im Quervergleich der Kampagne (i), Luft.

Abbildung 6 links zeigt die Temperaturen der LTC2, TC01 und S31 Sensoren im Quervergleich der Kampagne (ii), Luft und Abbildung 6 rechts die Temperaturen der LTC2 und TC01 im Quervergleich der Kampagne (iii) Wasser (iii).

In der Kampagne (ii), Luft, stimmte die Temperaturmessung des Inkubators sehr gut mit den digitalen Multimetern überein (Abweichung max. 1.3˚C, mittlere Abweichung von 0.2˚C). Die Sensoren zeigten alle eine sehr hohe Genauigkeit. Nach Anpassung aufgrund der Kalibration der Sensoren, befanden sich die mittleren Abweichungen aller Sensoren im Mittel bei rund 0.03˚C, mit wenig Variation zwischen den einzelnen Sensoren/Sensortypen.

In der Kampagne (iii), Wasser, stimmten die beiden Sensortypen TC01 und LTC2 gut mit der Temperatur des Inkubators überein. Bei allen Systemen wurde die eingestellte Temperatur erst nach einer zeitlichen Verzögerung erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wasser träge auf die eingestellte Temperatur reagierte. Die mittleren Abweichungen der Sensoren lagen im Mittel bei rund 0.003˚C, ebenfalls mit wenig Variation zwischen den einzelnen Sensoren. Die Genauigkeit bei dieser Kampagne ist um eine Grössenordnung besser gegenüber der Kampagne (ii). Dies liegt daran, dass die Temperatur im Wasserbehälter viel homogener gehalten werden konnte als bei den freiliegenden, luftumströmten Sensoren der Kampagne (ii).

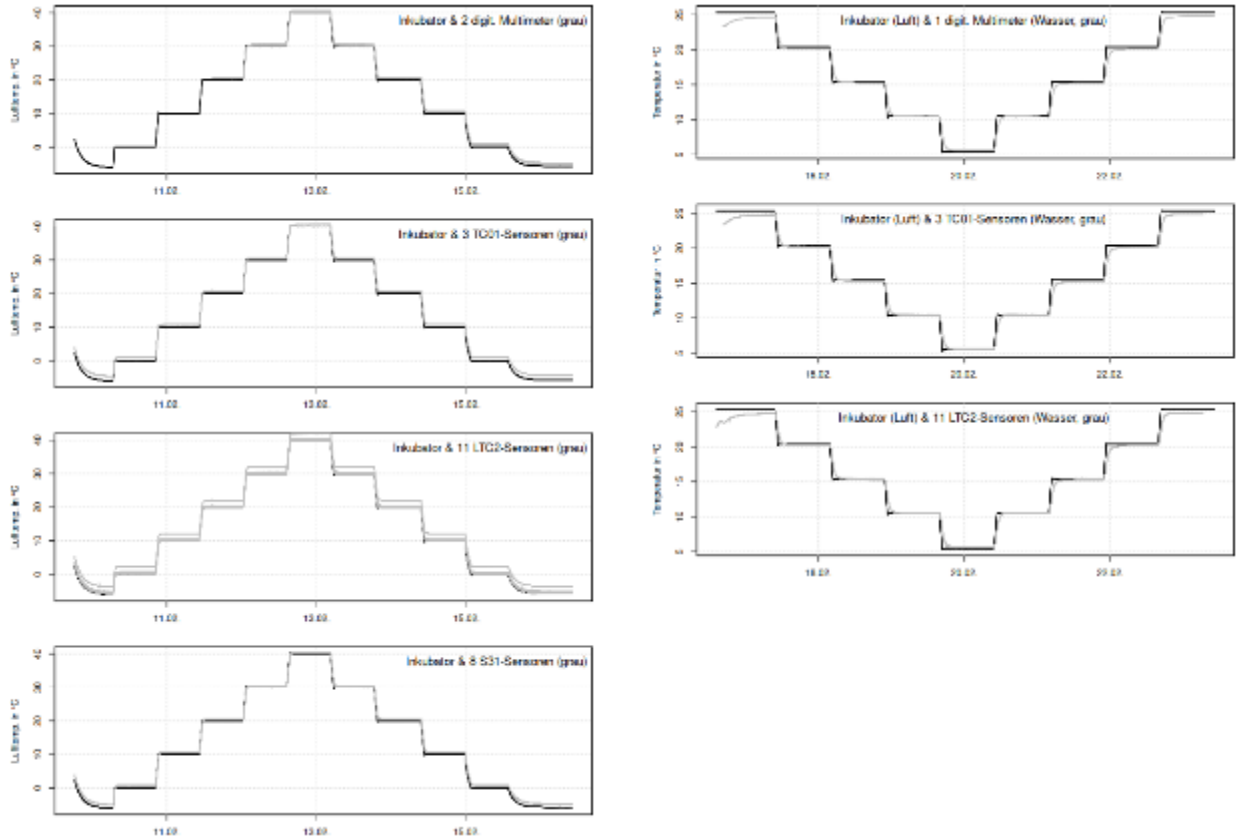


Abbildung 6: Temperaturen von Inkubator und Multimeter (1. Reihe), sowie der Sensoren TC01 (2. Reihe), LTC2 (3. Reihe) und S31 (4. Reihe) im Quervergleich der Kampagne (ii), Luft, Spalte links und Kampagne (ii), Wasser, Spalte rechts.

Zu Beginn der Kampagne (iv) zeigten alle Sensoren eine geringe Abweichung von weniger als 0.1˚C (Ausnahme: TC01_No1 mit 0.5˚C Abweichung; Abbildung 7). Die LTC2 stimmten bis etwa Woche 18 mit Ausnahme von einem Sensor gut überein (<0.1˚C Abweichung). Danach nahmen die Differenzen zu: Abweichungen von mehr als der Hälfte der Sensoren von

>0.05˚C; maximale Abweichung eines Sensors von rund 0.15˚C. Bei den S31 Sensoren sind grössere Abweichungen (bis rund 0.75˚C) zu beobachten. TC01_No1 näherte sich ab Woche 14 den beiden anderen Sensoren an. Ab diesem Zeitpunkt verblieben die Abweichungen unterhalb von 0.15˚C, d.h. in Bereich der Werte zu Beginn der Kampagne oder tiefer. Die Sensoren LTC2 und S31 zeigten ab Woche 18 bzw. 14 grössere Abweichungen im Vergleich zum Beginn der Kampagne. Dabei zeigte sich eine leichte Abhängigkeit zur Umgebungstemperatur mit höheren Abweichungen mit zunehmender Temperatur.

Diese Resultate deuten darauf hin, dass die Sonden über längere Zeit einem Drift unterliegen könnten. Dem ist bei der Rapportierung von Messergebnissen Rechnung zu tragen. Bei der Interpretation dieser Messungen unter nicht kontrollierten Bedingungen ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die beobachteten Abweichungen überschätzt sein können. Für künftige Quervergleiche über mehrere Wochen wird deshalb ein verbessertes Messdesign empfohlen, z.B. mit Platzierung der Sonden in eine Box mit kontinuierlicher Luftumwälzung.

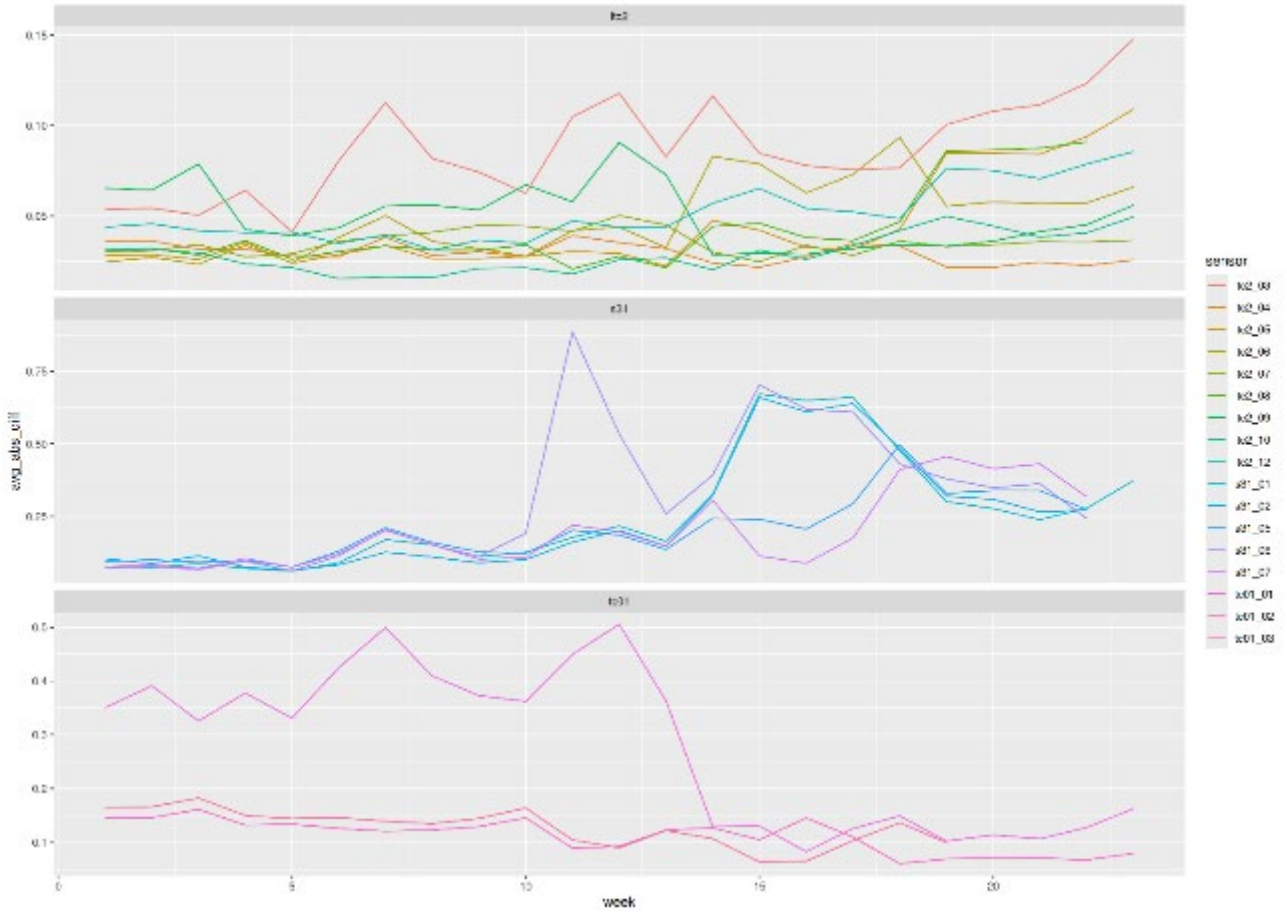


Abbildung 7: Abweichung der einzelnen Sensoren LTC2 (oben), S31 (Mitte) und TC01 (unten) vom Mittelwert der Sensoren LTC2 No 3,4,5,6,7 in Grad Celsius.

3.3 Messmethodik

3.3.1 Messgeräte und Datenübertragung

Die Zuverlässigkeit der Messgeräte und der Datenübertragung war ausreichend. Datenverluste wegen Ausfällen von Messgeräten waren verhältnismässig gering. Zeitweise regelmässig vorkommende Datenausfälle von einigen Stunden Dauer auf Betrieb 12 (Abbildung 17, Anhang 6) hatten einen vernachlässigbaren Einfluss auf die ermittelte mittlere Gülletemperatur, da sich diese sehr langsam ändert. Ein systematischer Einfluss ist nur dann zu erwarten, wenn ein Datenausfall über mehrere Wochen vorkommt und dadurch eine Veränderung der Gülletemperatur über diesen Zeitraum nicht erfasst wird. Mit Ausnahme der Monate Dezember 2024 und Januar 2025 für Betrieb 11 wurden in Bezug auf die gesamte Dauer eines Monats jeweils mindestens zwei Drittel der Zeit Gülletemperaturen mittels der LTC2 Sensoren erfasst (vgl. Sensor unten von Tabelle 16, Anhang 7). Die Füllstandssensoren deckten auf beiden Betrieben 53% bis 100% der Messzeit ab.

Messung und Datenübertragung mit den in den periodischen Messungen eingesetzten Geräten TC01 war ebenfalls gut. Grössere nicht erklärbare Datenausfälle kamen nur in wenigen Messkampagnen vor.

3.3.2 Methodik der Erfassung der Gülletemperatur

3.3.2.1 Repräsentativität der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen

Wie beschrieben in Kap. 2.5 erfolgte die kontinuierliche Messung der Gülletemperatur an einer Position in den Güllelagern auf 3 Tiefen. Meist war nur der unterste, d.h. im Abstand von 0.5 m vom Boden platzierte Sensor in die Gülle eingetaucht und erfasste somit die Gülletemperatur (vgl. Abbildung 11). Weiter war die Platzierung der Sonden nicht ideal (vgl. Kap. 3.1.1.1). Damit stellt sich die Frage der Repräsentativität der erfassten Gülletemperatur, welche grösstenteils nur an einem Punkt gemessen wurde. Dies wurde wie folgt überprüft: i) Vergleich der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen gemessen mit dem Sensor unten mit den Daten der Temperatursensoren, welche für die periodischen Temperaturmessungen eingesetzt wurden zum Zeitpunkt der periodischen Messungen; ii) Vergleich der Monatsmittelwerte der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen der Temperatursensoren unten, Mitte. Dabei wurden nur die Temperaturen der Zeitabschnitte gemittelt, während denen beide Sensoren gleichzeitig Messdaten lieferten. Der Sensor oben wurde weggelassen, da nur für wenige Messintervalle Daten für alle 3 Sensoren vorlagen. Damit lässt sich die horizontale i) und die vertikale Streuung ii) der Gülletemperaturen einschätzen.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich i). Die Abweichung zwischen Gülletemperaturen kontinuierlich gemessen und den periodischen Messungen ist im Mittel klein (<1˚C). An einzelnen Messtagen waren die Differenzen mit bis zu 3.5˚C dennoch relativ gross. Für einzelne Messtage liessen sich Abweichungen von 1˚C und mehr zumindest teilweise durch Fehler beim Vorgehen der periodischen Messungen erklären. Eine deutliche Abweichung war jedoch nicht in jedem Fall erklärbar. Daraus lässt sich schliessen, dass mit einer Messunsicherheit von ca. 1 bis max. 3˚C bei einer Messung der Gülletemperatur wie durchgeführt in dieser Studie zu rechnen ist.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich ii). Eine negative Abweichung von maximal 6.3˚C (Temperatur bei Sensor Mitte < Sensor unten) tritt auf Betrieb 11 in den Herbst- und Wintermonaten auf. Eine positive Abweichung von maximal von 3.2˚C liegt im Frühling und Sommer auf Betrieb 11 vor. Die Abweichungen sind kleiner bei Betrieb 12. Dies bedeutet, dass ein Temperaturgradient vorliegt. Bei Umgebungstemperaturen, die niedriger sind als die Gülletemperatur, wird die Gülle von der Oberfläche her abgekühlt und umgekehrt bei Umgebungstemperaturen, welche höher sind als die Gülletemperatur (Tabelle 17 in Anhang 8 zeigt alle

Messdaten der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen von Betrieb 11 und 12, bei denen beide Sensoren unten und Mitte Gülletemperaturen erfassten). Ein Profil mit Gülletemperaturen oben>Mitte>unten von Frühjahr bis Herbst und umgekehrt ab Spätherbst bis Winter wurde von Hung et al. (2024) für einen ungedeckten Silo, Schweinegülle, Kariyapperuma et al. (2018), für einen ungedeckten Silo, Rindviehgülle sowie VanderZaag et al. (2026) für ein Erdbecken, Rindviehgülle gefunden. Die Bezeichnung der Messpunkte oben, Mitte, unten bedeuten in diesen Studien eine Position von 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m unterhalb der Gülleoberfläche. Genedy und Ogejo (2026) beobachteten bei einem Erdbecken, für Rindviehgülle einen ähnlichen Temperaturgradienten, wenn auch weniger ausgeprägt (Messpositionen ab Boden Erdbecken: 0.45 m, 0.90 m 1.68 m, 2.44 m).

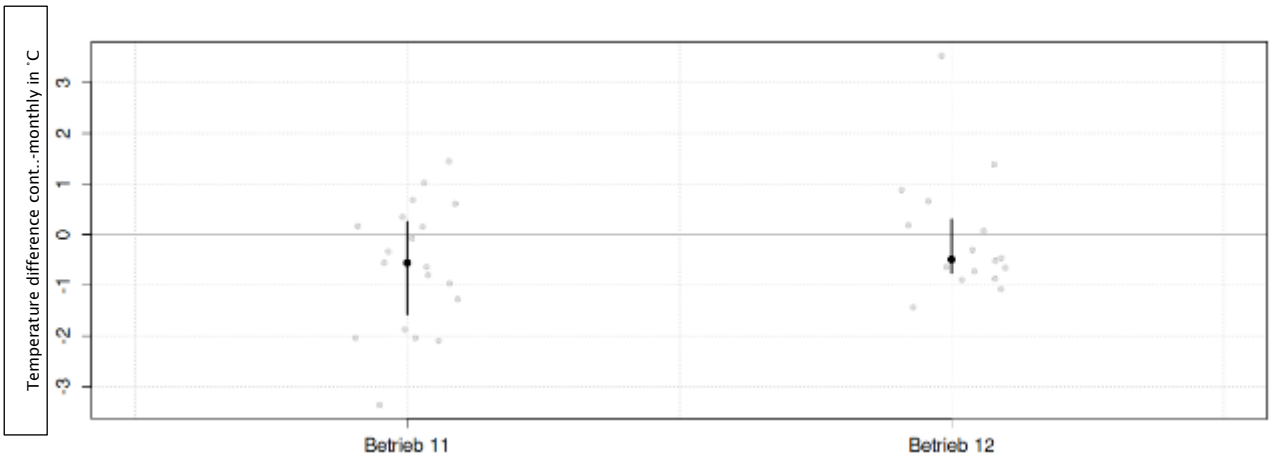


Abbildung 8: Abweichung der periodischen Messungen von Betrieb 11 bzw. 12 von den Gülletemperaturen kontinuierlich gemessen mit dem Sensor unten zum Zeitpunkt der periodischen Messungen in °C. Die grauen Punkte geben die gemittelte Abweichung an, wobei die Mittelung über alle Positionen und Tiefen unten, Mitte, oben einer einzelnen Messkampagne an einem Tag angegeben ist. Schwarzer Punkt und vertikale Line: Median der Abweichung und Interquartil Bereich.

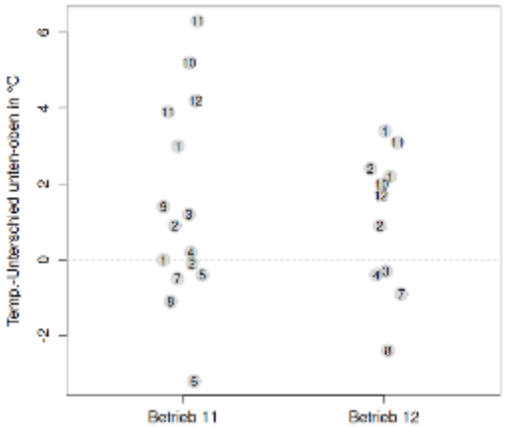


Abbildung 9: Vergleich der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen von unten und Mitte von Betrieb 11 (links) bzw. 12 (rechts). Angegeben ist die Abweichung der mittleren Monatstemperaturen zwischen den Gülletemperaturen kontinuierlich gemessen mit dem Sensor unten und Mitte in °C.

Der in der vorliegenden und in früheren Studien festgestellte Temperaturgradient suggeriert, dass die mittlere Gülletemperatur der Lager ausschliesslich basierend auf dem Temperatursensor unten nur begrenzt für das gesamte Güllevolumen repräsentativ ist. Die relativen Abweichungen sind allerdings nur dann gross (d.h.>30%), wenn wenig Messdaten von beiden Sensoren vorliegen. Dies bedeutet, dass ein deutlicher Temperaturgradient nur über kurze Zeitfenster vorlag. Ausnahmen sind die Monate 10/2025 und 11/2025 von Betrieb 11 und 1/2025 von Betrieb 12 (Tabelle 17, Anhang 8). Relative Abweichungen von >30% kommen nur in den Herbst- und Wintermonaten vor (d.h. bei Gülletemperatur>Umgebungstemperatur und Gülletemperatur Sensor Mitte < Sensor unten).

Tabelle 4 zeigt die kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen von Betrieb 11 und 12 erfasst mit Sensor unten (auch aufgeführt in Tabelle 6 und Tabelle 7) und gewichtete Gülletemperaturen basierend auf den Sensoren unten und Mitte.

Tabelle 4: Kontinuierlich gemessene Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) von Betrieb 11 und 12 Sensor unten (wie angegeben in Tabelle 6) und gewichtete Gülletemperaturen von Sensoren unten und Mitte nach Jahr und Monat. Δ absolut: Differenz zwischen den Gülletemperaturen Sensor unten und Sensoren unten und Mitte gewichtet in ˚C; Δ relativ: Differenz zwischen den Gülletemperaturen Sensor unten und den Sensoren unten und Mitte gewichtet in Prozent der Gülletemperatur von Sensor unten. Für Monate mit Δ absolut = 0.0 liegen nur Temperaturdaten von Sensor unten vor.

Betrieb	Jahr	Monat	Sensor unten in ˚C	Sensoren unten/Mitte gew. in ˚C	Δ absolut	Δ relativ
11	*2024*	*11*	*10.3*	*9.8*	*0.5*	*5%*
11	2024	12	8.2	6.5	1.7	20%
11	2025	1	6.3	5.2	1.1	18%
11	2025	2	7.0	6.7	0.3	4%
11	2025	3	7.4	7.4	0.0	0%
11	2025	4	9.4	9.4	0.0	0%
11	2025	5	11.6	11.8	-0.2	-1%
11	2025	6	15.9	15.8	0.1	0%
11	2025	7	17.8	17.9	-0.1	-1%
11	2025	8	18.2	18.4	-0.2	-1%
11	2025	9	17.4	17.2	0.2	1%
11	2025	10	14.8	13.4	1.4	9%
11	2025	11	10.5	9.9	0.6	6%
11	2025	12	9.0	8.9	0.1	1%
11	2026	1	6.1	6.1	0.0	-1%
11	*2026*	*2*	*6.2*	*6.2*	*0.0*	*0%*
12	*2024*	*11*	*12.1*	*10.1*	*2.0*	*17%*
12	2024	12	8.8	8.4	0.4	5%
12	2025	1	6.9	6.3	0.6	9%
12	2025	2	7.3	7.1	0.2	3%
12	2025	3	7.9	8.3	-0.4	-6%
12	2025	4	10.6	10.6	0.0	0%
12	2025	5	15.8	15.7	0.1	1%
12	2025	6	19.2	19.5	-0.3	-2%
12	2025	7	22.1	22.1	0.0	0%
12	2025	8	23.2	23.5	-0.3	-1%
12	2025	9	20.7	20.6	0.1	0%
12	2025	10	17.2	16.2	1.0	6%
12	2025	11	10.7	10.5	0.2	1%
12	2025	12	8.0	6.9	1.1	14%
12	2026	1	3.4	3.4	0.0	1%
12	*2026*	*2*	*4.9*	*4.6*	*0.3*	*7%*
11	2025	Mittelwert	12.1	11.8	0.3	3%
		Median	11.1	10.8	0.1	1%
		Minimum	6.3	5.2	0.0	0%
		Maximum	18.2	18.4	1.4	18%
12		Mittelwert	14.1	14.0	0.2	2%
		Median	13.3	13.2	0.1	1%
		Minimum	6.9	6.3	0.0	0%
		Maximum	23.2	23.5	1.1	14%

Für die Gewichtung wurden diejenigen Zeitabschnitte verwendet, in denen der Füllstand hoch genug war und beide Sensoren Gülletemperaturen erfassten (vgl. Tabelle 17, Anhang 8). Vom Sensor oben liegen nur sehr wenig Messdaten vor, so dass diese vollständig weggelassen werden. Bei der Gewichtung wurden anteilsmässig die untersten 100 cm des Lagers der Temperatur des Sensors unten und der gemessene Füllstand minus 100 cm der Temperatur des Sensors Mitte zugeordnet. Die gewichtete Temperatur ist in den meisten Fällen tiefer in den Herbst- und Wintermonaten als die Temperatur von Sensor unten und umgekehrt für Frühlings- und Sommermonate aufgrund des Temperaturgradienten zwischen Gülle und Umgebungsluft. Die Differenz beträgt maximal 20% der Temperatur von Sensor unten. Bei hohen Gülletemperaturen in den Sommermonaten ist die Differenz klein (maximal 6%). Gemittelt auf das ganze Jahr betragen die Differenzen 3% bzw. 2% für den Betrieb 11 bzw. 12. Daraus folgt, dass sich mit dem Sensor unten die Gülletemperatur ausreichend genau erfassen lässt trotz eines vorhandenen Temperaturgradienten. Dies allerdings nur, wenn der Füllstand wie bei den vorliegenden Lagern die meiste Zeit über niedrig ist. Im vorliegenden Fall entspricht dies im Mittel 160 cm für Betrieb 11 und 125 cm für Betrieb 12 (Kap. 3.4.1.1).

3.3.2.2 Repräsentativität der periodisch gemessenen Gülletemperaturen

Die statistische Auswertung gemäss Kap. 2.6.2 zeigt, dass kein statistisch signifikanter Unterschied besteht zwischen den Messdaten der Sensoren unten, Mitte, oben (Abbildung 10[5], P<0.05). Dasselbe gilt für die Positionen der Sensoren.

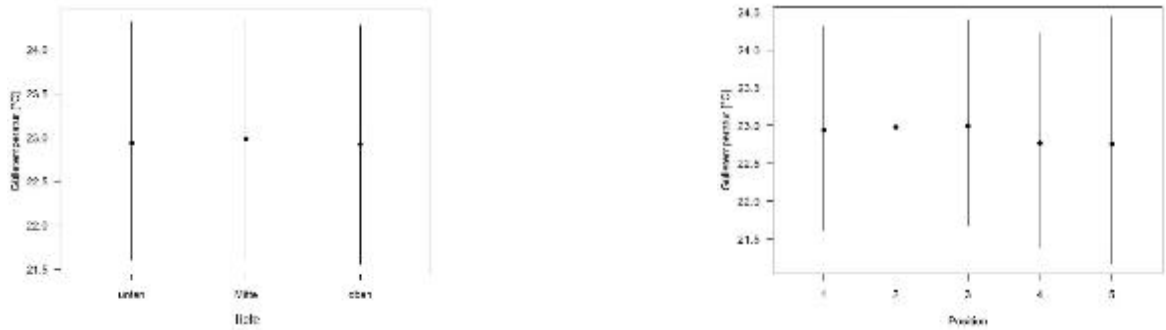


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Streuung der Temperaturwerte aller Messdaten der Sensoren unten, Mitte, oben (links) sowie aller Positionen 1 bis 5 (rechts): angegeben sind geschätzter Mittelwert und Vertrauensintervall. Die Daten sind normiert auf DOY 189 (Tag 189 von 365 Tagen des Jahres).

Die statistische Analyse der periodisch gemessenen Gülletemperaturen suggeriert, dass kein vertikaler Temperaturgradient in den Güllelagern vorliegt. Dies steht im Gegensatz zum Temperaturgradient, der im Rahmen der kontinuierlichen Messungen auf den Betrieben 11 und 12 festgestellt wurde (vgl. das vorige Kap. 3.3.2.1). In diesem Zusammenhang wurden die kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen, an welchen Messdaten von Sensor unten und Mitte verfügbar waren, mit den gleichzeitig erfassten Messdaten der periodischen Messung verglichen. Daten sind von insgesamt 11 Messungen verfügbar (Tabelle 5). An 9 Messtagen bzw. in 82% der Fälle lag bei den periodischen Messdaten ein Gradient vor wie erwartet entsprechend der Ausführungen von Kap. 3.3.2.1. Der Temperaturgradient zwischen Messpunkt unten-Mitte und unten-oben der periodisch erfassten Messdaten war deutlich kleiner als zwischen unten und Mitte gemäss kontinuierlicher Messung. Die absolute Abweichung der gemittelten Temperatur der Messpunkte unten der periodisch erfassten Messdaten war in allen Fällen <2°C. Dies deutet auf eine relativ gute Übereinstimmung

[5] Die angegebenen Temperaturbereiche entsprechen nicht den mittleren Temperaturen wie angegeben in Kap. 3.4.2, da normiert auf DOY 189. Die Darstellung von Abbildung 9 hat daher illustrativen Charakter. Die abgebildeten Effekte sind jedoch in jedem Temperaturbereich gültig.

der Messdaten zwischen den beiden Methoden hin. Die gemittelten Temperaturen der Messpunkte Mitte und oben der periodisch erfassten Messdaten wichen dagegen deutlich stärker vom Sensor Mitte der kontinuierlichen Messung ab (Tabelle 5). Dies deutet auf eine gewisse Diskrepanz zwischen den Temperaturdaten erhoben mit den beiden Methoden.

Tabelle 5: Vergleich der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen, an welchen Messdaten von Sensor unten und Mitte verfügbar waren, mit den gleichzeitig erfassten Messdaten der periodischen Messung. Fst: Füllstand in m; Ku, Km: Temperatur in ˚C der kontinuierlichen Messungen von Sensor unten (Ku) und Mitte (Km); Pu, Pm, Po, gemittelte Temperatur in ˚C der periodischen Messungen von 1 bis 5 Messpunkten unten (Pu), Mitte (Pm) und oben (Po); Grad.: Temperaturgradient von unten nach oben basierend auf kontinuierlicher Messung gleich wie periodische Messung: ja oder nein; Δ Ku-Pu, Δ Km-Pm, Δ Km-Po: Abweichungen der gemessenen Gülletemperaturen kontinuierlich und periodisch gemessen.

B	Datum	Fst	Ku	Km	Pu	Pm	Po	Grad.	Δ Ku-Pu	Δ Km-Pm	Δ Km-Po
		m	˚C					-	˚C		
11	17.01.2025	2.3	6.4	2.9	5.5	5.3	4.3	ja	0.9	-2.4	-1.4
11	10.02.2025	2.1	7.6	4.5	5.9	6.2	5.1	ja	1.7	-1.8	-0.6
11	24.04.2025	1.9	10.7	8.0	10.5	10.5	10.6	nein	0.2	-2.4	-2.5
11	04.07.2025	2.0	17.7	20.8	19.0	18.4	18.7	ja	-1.3	2.4	2.1
11	14.08.2025	1.8	18.3	21.6	19.9	19.6	20.3	ja	-1.6	2.1	1.4
11	11.09.2025	2.2	17.4	16.0	18.0	18.1	17.9	ja	-0.7	-2.1	-1.9
11	10.10.2025	1.8	15.2	12.1	14.7	15.4	15.5	nein	0.5	-3.3	-3.4
12	17.01.2025	1.9	6.8	3.6	6.9	6.9	5.5	ja	-0.2	-3.3	-1.9
12	24.02.2025	2.3	7.2	7.0	7.9	7.8	7.7	ja	-0.7	-0.9	-0.8
12	23.04.2025	1.7	12.5	11.1	12.3	12.1	12.0	ja	0.3	-1.1	-1.0
12	15.08.2025	1.9	25.7	25.9	26.6	26.7	27.6	ja	-0.9	-0.9	-1.8
Anteil Messungen mit Temperaturgradient kontinuierliche und periodische Messung / Temperaturdifferenz absolut zwischen kontinuierlicher und periodischer Messung <2˚C								82%	100%	36%	73%

3.4 Messresultate

3.4.1 Kontinuierliche Messungen

3.4.1.1 Füllstand und Durchmischen der Gülle

Abbildung 11 zeigt den Verlauf des Füllstands der Lagerbehälter von Betrieb 11 und 12. Die beiden Lager wiesen unterschiedliche Muster auf. Bei Lager Betrieb 11 erfolgte eine Erhöhung des Füllstands meist kontinuierlich. Dies war zu erwarten, da das Lager unter dem Laufhof des Milchkuhstalls liegt, in dem die Tiere ihre Ausscheidungen aufgrund der perforierten Lauffläche kontinuierlich und direkt in das Lager absetzen. Weiter gelangte auch Niederschlagswasser in das Lager, da der Laufhof zum grössten Teil nicht überdacht ist. Eine Abnahme des Füllstands erfolgte durch Entleerung in ein Endlager, wenn das Lager den maximalen Füllstand erreichte oder wenn Gülle für die Ausbringung abgepumpt wurde. Das Lager von Betrieb 12 ist ein Endlager und wird periodisch von einer Vorgrube aus befüllt. Eine Abnahme des Füllstands fiel somit immer mit einer Gülleausbringung zusammen. Ein Eintrag von Niederschlagswasser erfolgte nur indirekt via den grösstenteils ungedeckten Laufhof bzw. via Vorgrube. Abbildung 11 zeigt, dass der Füllstand in beiden Lagern über die meiste Zeit niedrig war, so dass nur der unterste Temperatursensor in die Gülle eingetaucht war und die Gülletemperatur erfasste. Der Füllstand von Betrieb 11 betrug im Mittel 160 cm und von Betrieb 12 125 cm (vgl. Tabelle 16; Anhang 7). Der Füllstand eines Güllesilos (Tiefe: 4.5 m) im Kanton Zürich wies mit durchschnittlich 140 cm und 120 cm über 2 Jahre bzw. 1 Jahr ähnliche Werte auf (Kupper et al., 2021,a,b).

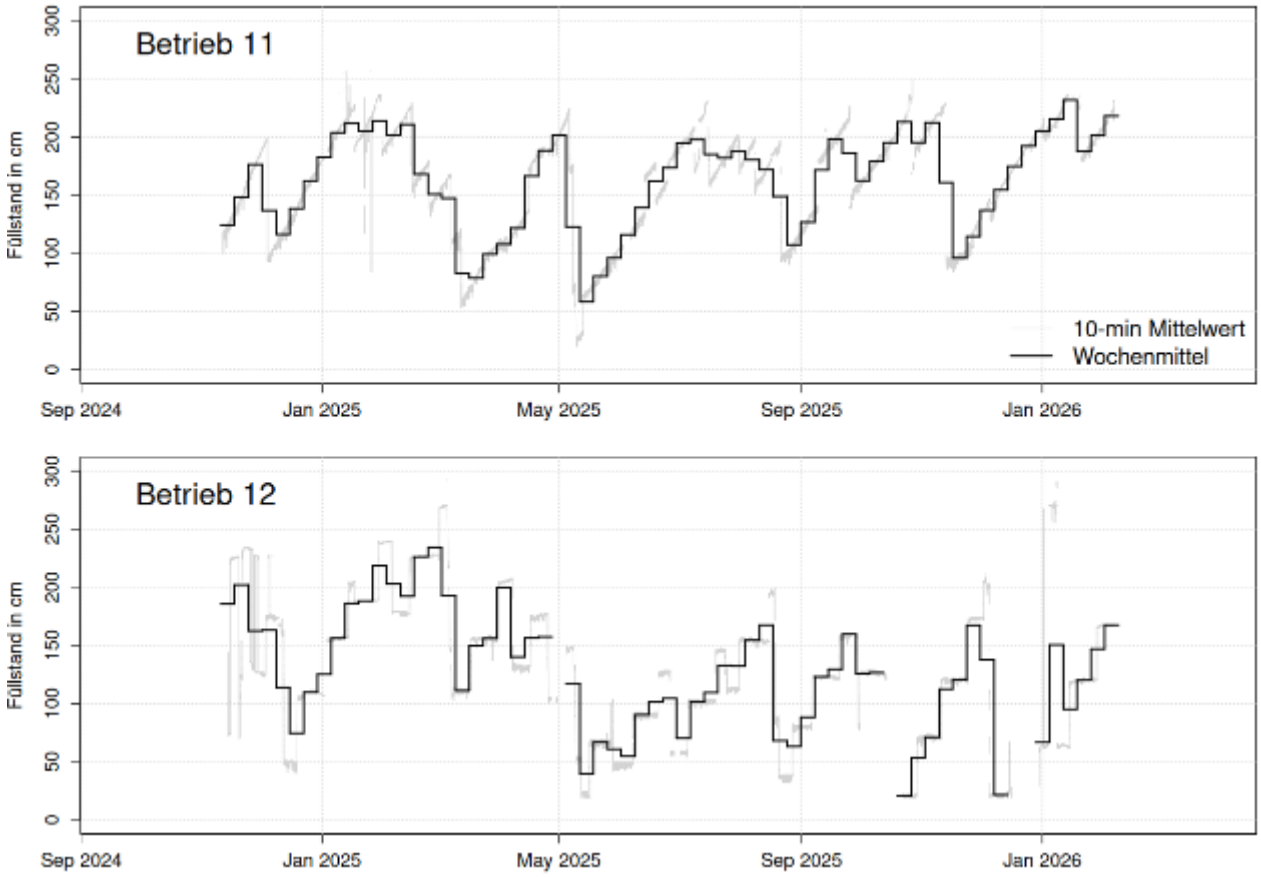


Abbildung 11: Verlauf des Füllstands der Lagerbehälter 1 von Betrieb 11 (oben) und 12 (unten) in cm zwischen 11.11.2024 bzw. 14.11.2024 und 06.02.2026 angegeben als 10 Minuten Mittelwert und gemittelt über eine Woche.

Im Güllelager Betrieb 11 wurde die Gülle rund 1 bis 2-Mal wöchentlich durchmischt und bei Betrieb 12 ca. 5-Mal pro Jahr bzw. bei jeder Ausbringung. Dadurch ist zu erwarten, dass

ein vorliegender Temperaturgradient zumindest vorübergehend ausgeglichen wurde. Dies liess sich allerdings nicht verifizieren, weil Datum und Uhrzeit des Betriebs des Rührwerks nicht erfasst wurden.

3.4.1.2 Gülletemperaturen im Vergleich zu den Temperaturen der Umgebungsluft

Die Präsentation und die Diskussion der Gülletemperaturen im Vergleich zu den Temperaturen der Umgebungsluft basiert ausschliesslich auf der Gülletemperatur der Temperatursonde unten (Position: 0.5 m oberhalb des Bodens des Güllelagers; vgl. Kap. 3.3.2). Abbildung 12 zeigt den Verlauf der kontinuierlich gemessenen Gülletemperatur zwischen 11.11.2024 bzw. 14.11.2026 und 06.02.2026 von Betrieb 11 und 12 sowie die Lufttemperaturen der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen. Die Gülletemperatur zeigte einen typischen Jahresgang mit einem Minimum im Winter bzw. im Monat Januar und einem Anstieg bis zum Maximum im Sommer bzw. Monat August. Die Umgebungstemperatur wies ein ähnliches Profil auf. Allerdings variierte die Lufttemperatur kurzfristig, wogegen die Gülle einen trägen Verlauf mit ausschliesslich längerfristigen Temperaturschwankungen zeigte. Frühere Studien (Balde et al., 2016b; Hung et al., 2024; VanderZaag et al., 2026) weisen ein ähnliches Muster auf. Weiter reagiert die Gülle verzögert auf eine Erhöhung bzw. Abnahme der Lufttemperatur. Dies ist besonders aufgeprägt im Herbst, während der die Gülletemperatur lange Zeit deutlich über der Lufttemperatur bleibt. Dieser Verlauf stimmt weitgehend (Balde et al., 2016b; Kariyapperuma et al., 2018) oder zumindest teilweise (Hung et al., 2024; VanderZaag et al., 2026) mit früheren Studien überein.

Die Gülletemperatur lag im Winter bei beiden Betrieben über dem Minimum der Umgebungstemperatur und im Sommer niedriger beim Lager des Betriebs 11 mit Unterflurlager unter dem Laufhof mit perforierter Abdeckung. Bei Betrieb 12 verblieb die Gülletemperatur auch im Sommer über der Umgebungstemperatur. Dies ist durch die Zeltabdeckung des Silos zu erklären. Die Temperatur in der Luft unter dem Zeltdach (=Headspace) überstieg die Umgebungstemperatur deutlich (maximal gemessene Temperaturen >45°C). Im Unterflurlager mit perforierter Abdeckung von Betrieb 11 lag die Temperatur im Headspace dagegen im Bereich der oder tendenziell niedriger als die Umgebungstemperatur (Abbildung 13). Höhere Gülletemperaturen im Winter als die Umgebungstemperatur wurden auch in anderen Studien beobachtet (Balde et al., 2016b; Hung et al., 2024; VanderZaag et al., 2026). Eine Überhöhung der Gülletemperatur im Vergleich zur Umgebungstemperatur im Sommer wurde von Hung et al. (2024) bei einem ungedeckten Silo für Schweinegülle gefunden, ebenso von VanderZaag et al (2022) für ein Erdbecken für Schweinegülle. Ein Verhältnis Gülletemperatur < Umgebungstemperatur in der warmen Jahreszeit zeigten die Studien von Balde et al. (2016b) und VanderZaag et al. (2026).

Abbildung 13 zeigt weiter die Lufttemperatur im Vergleich zur gemessenen und modellierten Gülletemperatur (detailliertere Darstellung der modellierten Gülletemperaturen: Abbildung 19, Anhang 10). Diese wurde basierend auf der Lufttemperatur wie folgt hergeleitet: Mittelung der Lufttemperatur über die vorhergehenden 50 Tage für jeden Zeitpunkt; Abgleich der Koeffizienten der modellierten Gülletemperatur auf die gemessene Gülletemperatur mittels linearer Regression: $T_{guelle_meas} = a + b * T_{luft_avg50d}$.

Die modellierte Gülletemperatur kann verwendet werden, um beispielsweise Datenlücken zu füllen. Abbildung 19 zeigt überwiegend eine gute Übereinstimmung der modellierten und der gemessenen Temperatur. Es ist zu beachten, dass für jedes Güllelager ein entsprechendes Modell erstellt werden muss.

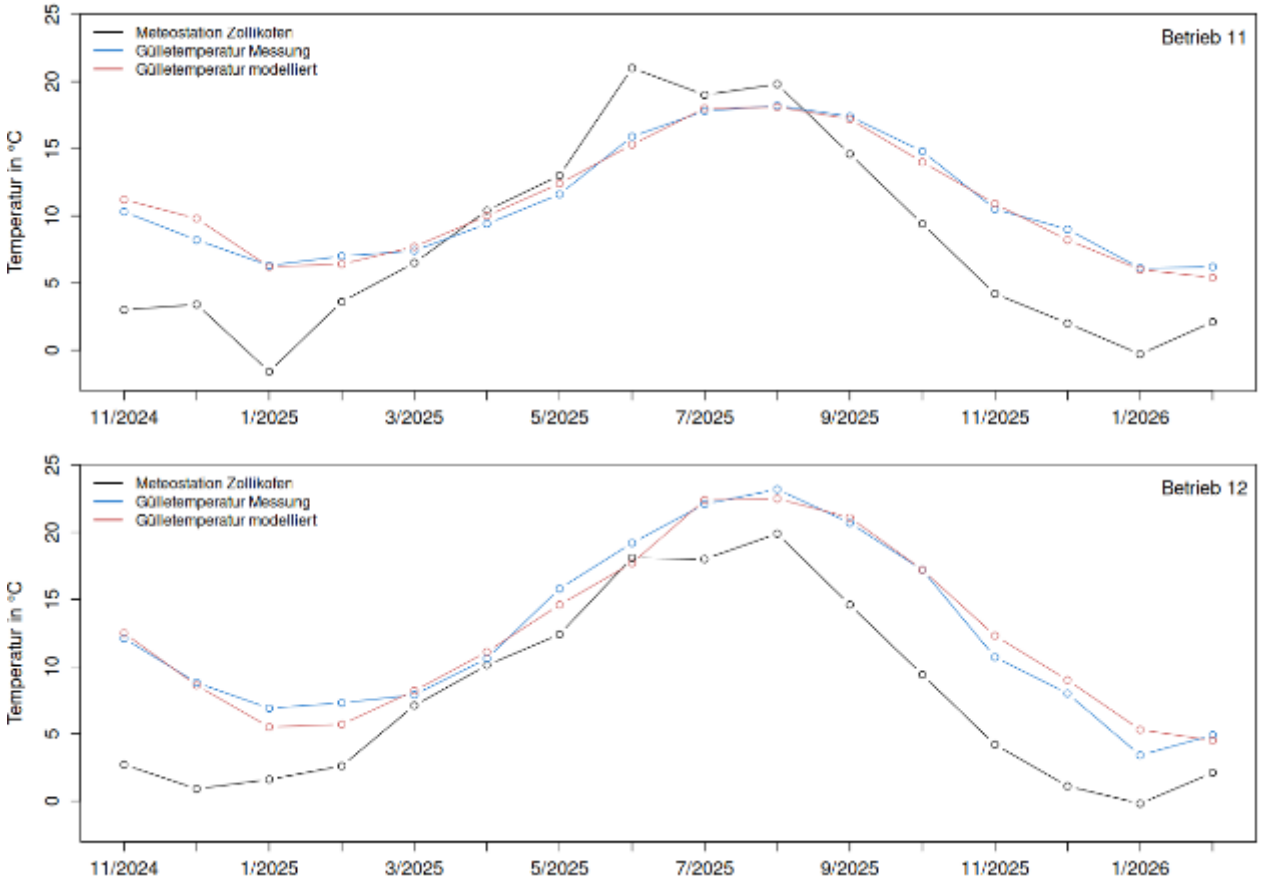


Abbildung 12: Verlauf der kontinuierlich gemessenen Gülletemperatur von Betrieb 12 (oben) und 11 (unten) zwischen 11.11.2024 bzw. 14.11.2024 und 06.02.2026 gemessen mit dem Sensor unten sowie die Lufttemperaturen der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen. Angegeben sind die Monatsmittelwerte. Betrieb 11 hat ein Unterflurlager unter dem Laufhof mit perforierter Abdeckung und Betrieb 12 einen Silo aus Beton mit Zeltabdeckung. Detailliertere Abbildungen der gemessenen sowie der gemessenen plus modellierten Gülletemperaturen sind in Anhang 9 bzw. Anhang 10 aufgeführt.

Tabelle 6 zeigt die monatlich gemittelten Gülletemperaturen und die Lufttemperaturen der der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen, sowie die Differenzen zwischen Gülletemperaturen und Lufttemperaturen. Die Abweichungen liegen für 10 (Betrieb 11) bzw. 12 (Betrieb 12) von total 16 Monatsmittelwerten über 3˚C (dies entspricht 63% bzw. 75% aller Monatsmittelwerte). Die Abweichungen sind gross in der kalten Jahreszeit und klein in der warmen Jahreszeit. Weniger als 3˚C Differenz kommt bei Betrieb 11 in den Monaten März bis Mai und Juli bis September vor. Bei Betrieb 12 betrifft es die Monate März, April und Juni. Die maximale Abweichung beträgt 7.9˚C (Januar 2025) für Betrieb 11 und 9.4˚C (November 2024) für Betrieb 12.

Bei Betrieb 12 lag die Temperatur im Januar, Februar 2026 mit 3.4˚C bzw. 4.9˚C deutlich tiefer als in den gleichen Monaten von 2025 (6.9˚C bzw.7.3˚C). Dies bei ähnlich hohen Gülletemperaturen im jeweiligen Vormonat Dezember (8.8˚C bzw. 8.0˚C) und wenig Unterschieden bei der Lufttemperatur der Monate Dezember bis Februar 2024/2025 bzw. 2025/2026. Dies ist dadurch zu erklären, dass im Dezember 2025 das Lager fast vollständig geleert wurde (Füllstand <0.5 m), wogegen der Füllstand im Dezember 2024 nie rund 1 m unterschritt (vgl. Abbildung 11). Dadurch wurde die verhältnismässig kleine Güllemenge im Januar 2026 von der kühlen Luft im Headspace des Lagers und von ebenfalls kalten Boden/Wänden des Güllelagers viel stärker abgekühlt, als dies im Januar 2025 der

Fall war. Dieses Beispiel zeigt, dass die Gülletemperatur von Jahr zu Jahr je nach Bewirtschaftung des Güllelagers bzw. der Hofdünger variieren kann.

Tabelle 6: Temperaturen der Umgebungsluft (Luft, ˚C) der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen und die kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) von Betrieb 11 und 12 nach Jahr und Monat. n: Anzahl 10-Minutenintervalle mit parallel vorliegenden Messdaten Luft und Gülle; Δ absolut: Differenz zwischen der Temperatur Luft und Gülle in ˚C; Δ relativ: Differenz zwischen der Temperatur Luft und Gülle in Prozent der Gülletemperatur.

Betrieb	Jahr	Monat	n	Luft in ˚C	Gülle in ˚C	Δ absolut	Δ relativ
11	*2024*	*11*	*2788*	*3.0*	*10.3*	*7.3*	*71%*
11	2024	12	867	3.4	8.2	4.8	59%
11	2025	1	734	-1.6	6.3	7.9	125%
11	2025	2	2670	3.6	7.0	3.4	49%
11	2025	3	4450	6.5	7.4	0.9	12%
11	2025	4	4314	10.4	9.4	-1.0	-11%
11	2025	5	3551	13.0	11.6	-1.4	-12%
11	2025	6	3509	21.0	15.9	-5.1	-32%
11	2025	7	4464	19.0	17.8	-1.2	-7%
11	2025	8	4333	19.8	18.2	-1.6	-9%
11	2025	9	4303	14.6	17.4	2.8	16%
11	2025	10	4452	9.4	14.8	5.4	36%
11	2025	11	4288	4.2	10.5	6.3	60%
11	2025	12	4464	2.0	9.0	7.0	78%
11	2026	1	4352	-0.3	6.1	6.4	105%
11	*2026*	*2*	*771*	*2.1*	*6.2*	*4.1*	*66%*
12	*2024*	*11*	*2354*	*2.7*	*12.1*	*9.4*	*78%*
12	2024	12	3289	0.9	8.8	7.9	90%
12	2025	1	4438	1.6	6.9	5.3	77%
12	2025	2	3980	2.6	7.3	4.7	64%
12	2025	3	3316	7.1	7.9	0.8	10%
12	2025	4	3849	10.1	10.6	0.5	5%
12	2025	5	3025	12.4	15.8	3.4	22%
12	2025	6	2930	18.1	19.2	1.1	6%
12	2025	7	3835	18.0	22.1	4.1	19%
12	2025	8	3047	19.9	23.2	3.3	14%
12	2025	9	4295	14.6	20.7	6.1	29%
12	2025	10	3072	9.4	17.2	7.8	45%
12	2025	11	4247	4.2	10.7	6.5	61%
12	2025	12	856	1.1	8.0	6.9	86%
12	2025	1	4459	-0.2	3.4	3.6	106%
12	*2025*	*2*	*736*	*2.1*	*4.9*	*2.8*	*57%*

Tabelle 7 zeigt einen Vergleich der durchschnittlichen Gülletemperaturen der Lager der Betriebe 11 und 12. Der Unterschied der mittleren Temperatur zwischen den Betrieben beträgt 2˚C (Absolutwerte: 12.1˚C für Betrieb 11 und 14.1˚C für Betrieb 12). Die maximale Monatsmitteltemperatur ist um 5˚C höher für Betrieb 12. Die allgemein höheren Gülletemperaturen von Betrieb 12 sind durch die Zeltabdeckung des Silos zu erklären wie vorgängig

ausgeführt. Beim Unterflurlager mit perforierter Abdeckung von Betrieb 11 ist ein solcher Effekt nicht zu erwarten. Die mittlere Überhöhung der Gülletemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur beträgt 1.9˚C für Betrieb 11 und 4.2˚C für Betrieb 12.

Tabelle 7: Übersicht Temperaturen der Umgebungsluft (Luft, ˚C) der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen und der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) von Betrieb 11 und 12 für das Jahr 2025: Mittelwert, Median, Minimum und Maximum der Monatsmitteltemperaturen. n: Anzahl 10-Minutenintervalle mit parallel vorliegenden Messdaten Luft und Gülle.

Betrieb		Temperatur Umgebungsluft in ˚C	Gülletemperatur in ˚C
11	n	45532	
	Mittelwert	10.2*	12.1
	Median	9.9	11.1
	Minimum	-1.6	6.3
	Maximum	21.0	18.2
12	n	40890	
	Mittelwert	9.9*	14.1
	Median	9.8	13.3
	Minimum	1.1	6.9
	Maximum	19.9	23.2

* Die gemittelte Temperatur der Umgebungsluft unterscheidet sich zwischen Betrieb 11 und 12, obwohl sie auf dem gleichen Datensatz (Station MeteoSchweiz Zollikofen) basieren. Die Differenz ist durch die unterschiedliche Anzahl 10-Minutenintervalle mit parallel vorliegenden Messdaten Luft und Gülle zu erklären.

3.4.1.3 Temperaturen der Umgebungsluft, in Stall, Laufhof und Headspace des Güllelagers

Die auf dem Betrieb 11 gemessenen Temperaturen von Stall und Laufhof liegen über das ganze Jahr höher als die Umgebungstemperatur der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen (Anhang 11). Die Abweichung beträgt im Mittel 1 bis 3˚C. Die Überhöhung der Stall- und Laufhoftemperaturen ist höher im Winter und der Übergangszeit als im Sommer. Dies ist auf die von den Tieren produzierte Wärme zurückzuführen. Im Sommer (Stall und Laufhof) und Frühherbst (Laufhof) ist die Überhöhung kleiner, was durch die Beschattung von Stall und Laufhof zu erklären sein dürfte. Zu erwähnen ist auch, dass die Temperaturmessung der Umgebungsluft von Betrieb 11 kaum von derjenigen der Station von MeteoSchweiz abweicht mit Ausnahme von Juli und August mit einer längerdauernden Abweichung um ca. plus 1˚C. Dies gute Übereinstimmung ist aufgrund der geringen Distanz (ca. 220 m) der MeteoSchweiz Station zum Betrieb 11 zu erwarten.

Betrieb 12 zeigt generell eine kleinere Temperaturüberhöhung von Stall und Laufhof gegenüber der Umgebungstemperatur (Station von MeteoSchweiz, Zollikofen)[6]. Im Sommer zeigten alle Temperatursensoren Umgebung, Stall, Laufhof drei mehr oder weniger lang dauernde Zeitfenster mit tieferen Temperaturen als gemessen von MeteoSchweiz, Zollikofen. Die unterschiedlichen Muster der Temperaturverläufe zwischen den beiden Ställen dürfte durch deren Lage und Exposition zu erklären sein. Betrieb 11 liegt an einem Hang mit einer Neigung von ca. 5% in Richtung Süd-Südost. Das Gelände von Betrieb 12 weist rund 5% Neigung in Richtung Nord auf. An der tiefsten Stelle angrenzend an den Standort des Betriebs verläuft ein Bach, der ebenfalls zu einer kühleren Umgebung beitragen dürfte. Bei beiden Betrieben führen die Gebäudestrukturen zu Beschattung von Stall und Laufhof. Im Winter wurde die gegen Osten liegende offene Seite des Laufhofs mit Planen

[6] Distanz Luftlinie zwischen Stall von Betrieb 12 und Station von MeteoSchweiz, Zollikofen: ca. 9.8 km.

geschlossen. Dies vermindert den Luftaustausch und erhöht die Aufenthaltsdauer der von den Tieren erwärmten Luft innerhalb von Stall und Laufhof.

Die Temperatur im Headspace des Güllelagers von Betrieb 11 (Grafiken ‘Headspace’ und Sensor «oben»’) sind überwiegend tiefer als die Umgebungstemperatur. Umgekehrt verhält sich Güllelagers von Betrieb 12, dessen Headspace aufgrund der Zeltabdeckung praktisch während des ganzen Jahres über der Umgebungstemperatur lag. Die Temperaturüberhöhung ist im Sommer mit bis zu rund 8°C ausgeprägt aufgrund der Sonneneinstrahlung auf die Kunststoffplane des Zeltdachs (Abbildung 13).

Betrieb 11



Betrieb 12

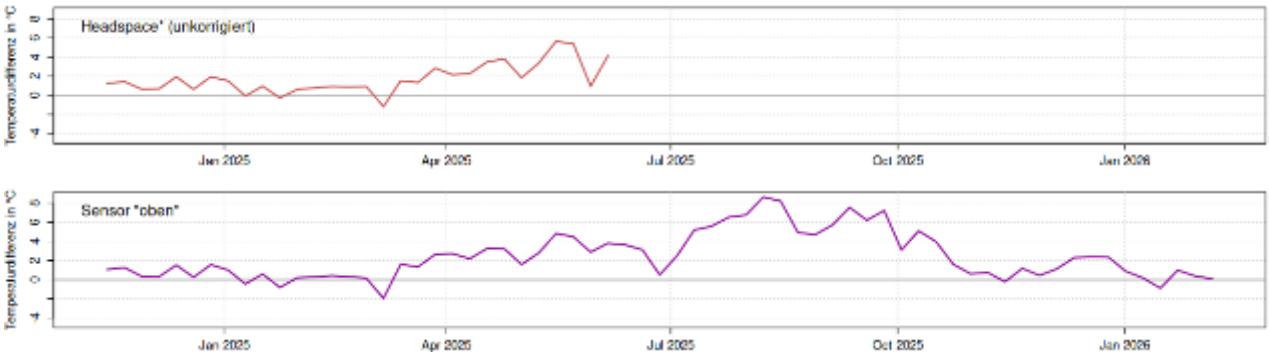


Abbildung 13: Verlauf der Lufttemperatur im Headspace des Güllelagers von Betrieb 11 (oben) und 12 (unten) zwischen 11.11.2024 bzw. 14.11.2024 und 06.02.2026 gemessen mit dem Sensor S31 und Temperatursensor oben. Betrieb 11 hat ein Unterflurlager unter einem Laufhof mit perforierter Abdeckung und Betrieb 12 einen Silo aus Beton mit Zeltabdeckung. Detailliertere Abbildungen der gemessenen sowie der gemessenen plus modellierten Gülletemperaturen sind in Anhang 11 aufgeführt. Bei Betrieb 12 ist die Temperatur des Headspace mit unkorrigiert bezeichnet, da der dort eingesetzte Sensor in keinem Quervergleich eingesetzt werden konnte.

3.4.2 Periodische Messungen

Die Gülletemperaturen sämtlicher Güllelagertypen zeigen grundsätzlich das gleiche Muster wie die kontinuierlichen Messungen (Tabelle 8) mit den folgenden Merkmalen:

- Gülletemperaturen Winter<Frühjahr<Herbst<Sommer
- Minimale Gülletemperatur im Winter, die deutlich höher liegt als die Lufttemperatur
- Erwärmung der Gülle von Frühjahr bis Sommer mit kleinen Abweichungen zur Lufttemperatur
- Verzögerte Abkühlung im Herbst mit Gülletemperatur deutlich höher als Lufttemperatur

Tabelle 8: Mittlere Temperatur der periodisch gemessenen Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) der 11 Betriebe geordnet nach Typ sowie gemittelte Temperaturen der Umgebungsluft (Luft, ˚C) der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen. n: Anzahl Lager je Typ. Messdaten von jedem einzelnen Lager: Anhang 12

Jahreszeit/ Jahresmittelwert	Typ Güllelager	n	Rindvieh*	n	Schwein	Temperatur Luft in ˚C
		Temperatur Gülle in ˚C				
Winter	Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung*	5	7.9	-	-	1.4
Frühjahr		5	9.4	-	-	10.0
Sommer		5	18.3	-	-	19.9
Herbst		5	14.3	-	-	9.4
Jahresmittelwert			12.5			10.2
Winter	Unterflurlager mit fester Abdeckung	5	7.2	-	-	1.4
Frühjahr		5	10.3	-	-	10.0
Sommer		5	17.8	-	-	19.9
Herbst		5	14.9	-	-	9.4
Jahresmittelwert			12.6			10.2
Winter	Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung	2	9.5	1	12.4	1.4
Frühjahr		1	11.9	-	-	10.0
Sommer		2	20.9	1	24.3	19.9
Herbst		2	15.8	1	17.1	9.4
Jahresmittelwert			14.5		-	10.2
Winter	Silo ungedeckt	2	8.8	1	7.3	1.4
Frühjahr		2	11.0	1	16.9	10.0
Sommer		2	20.5	1	21.6	19.9
Herbst		2	14.9	1	13.9	9.4
Jahresmittelwert			13.8		14.9	10.2
Winter	Silo mit Zeltabdeckung	1	7.7	-	-	1.4
Frühjahr		1	12.6	-	-	10.0
Sommer		1	22.6	-	-	19.9
Herbst		1	18.5	-	-	9.4
Jahresmittelwert			15.4			10.2

*1 Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung enthält ein Gemisch aus Schweine- und Rindviehgülle (Lager 2 von Betrieb 2).

Eine Abweichung zu diesen Merkmalen zeigt Schweinegülle gelagert in einem ungedeckten Silo mit höheren Gülletemperaturen im Frühjahr als im Herbst. Schweinegülle zeigte tendenziell höhere Temperaturen als Rindviehgülle. Allerdings ist die Datengrundlage mit nur zwei Lagern des gleichen Betriebs, davon eine Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung und ein Silo ungedeckt, sehr schmal. Ein Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung, das ein Gemisch aus Rindvieh- und Schweinegülle enthält, ist unter den Lagern mit Rindviehgülle aufgeführt. Es weist im Mittel niedrigere Temperaturen auf als die Lager des gleichen Typs mit reiner Rindviehgülle.

Die unterschiedlichen Typen von Lagern weisen kleine Unterschiede der Gülletemperatur auf mit Ausnahme des Typs Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung sowie Silo mit Zeltabdeckung, die beide eine um rund 1˚C bzw. 2˚C höhere mittlere Temperaturen aufweisen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Temperaturmessung kann man jedoch nicht von systematischen Unterschieden sprechen. Einzig beim Typ Silo mit Zeltdachabde-

ckung sollte man von erhöhten Werten ausgehen. Allerdings ist die Datengrundlage bei einem Lager mit Zeltdach sehr schmal. Die Jahresmittelwerte der Gülletemperaturen zeigten eine Überhöhung gegenüber der mittleren Lufttemperatur von rund 2°C für die Unterflurlager. Für Vorgruben und Silos betrug die Differenz der Gülletemperatur zur Umgebungstemperatur bis rund 3.5°C bis 5°C.

Für Betrieb 1 mit Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung (Rindvieh) liegen ausschliesslich Testmessungen vom Frühjahr 2024 vor, die nicht in die Auswertung eingeschlossen wurden. Die gemessenen Temperaturen sind jedoch vergleichbar mit denjenigen der Messungen von Frühjahr 2025 des gleichen Lagertyps. Das Lager 1 von Betrieb 6 (Silo ungedeckt) wurde ebenfalls nur während der Testmessungen im Frühjahr 2024 untersucht. Hier erfolgte die Lagerung von Gärgülle, welche im Abstand von einigen Tagen aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage angeliefert wurde. Dieses Lager wies im Mittel rund 22°C und in der zweiten Hälfte der Messperiode fast durchgehend Temperaturen zwischen ca. 25°C und 35°C auf. Diese hohen Werte sind durch die Anlieferung von Gärgülle zu erklären, welche bei der Anlieferung eine Temperatur von deutlich grösser als 30 bis ca. 40°C aufwies. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls nicht für die Auswertung der Daten von Tabelle 8 verwendet. Die Daten der Testmessungen sind in Anhang 4 für Betrieb 1 und in Anhang 5 für Betrieb 6 dokumentiert.

Harzer et al. (2025) fanden in Norddeutschland eine durchschnittliche Temperatur bei vier ungedeckten Silos mit Rindviehgülle von 16°C und bei drei rechteckigen Erdbecken mit Gärgülle von 24°C. Die Tiefstwerte im Winter betrugen 5.0°C für Rindviehgülle sowie 6.5°C für Gärgülle und die Höchstwerte im Sommer maximal 25°C bzw. 36°C. Die Messwerte von Rindviehgülle sind etwas höher als die Werte der vorliegenden Studie für den Typ Silo ungedeckt in Tabelle 8. Im Vergleich zu Daten aus Kanada (Maldaner et al., 2018) sind die Gülletemperaturwerte der vorliegenden Studie im Jahresmittel um rund 5°C höher (Tabelle 9). Die Abweichung ist mit ca. 3°C kleiner im Winter und im Herbst, dagegen in Frühjahr und Sommer mit 6-9°C grösser. Die Umgebungstemperatur der Studie von Maldaner et al. (2018) ist vor allem im Winter und im Frühjahr deutlich tiefer als in der Schweiz, im Sommer und im Herbst dagegen vergleichbar. Balde et al. (2016b) fanden in Kanada Jahreshöchstwerte von Gülletemperaturen eines ungedeckten Silos für Rindviehgülle von rund 21 bis 22°C bei Umgebungstemperaturen die rund 1 bis 2°C tiefer lagen.

Tabelle 9: Vergleich der mittleren Gülletemperaturen (Gülle, °C) von Rindviehgülle gelagert in Silo ungedeckt zwischen den Daten der Betriebe 2 und 9 der vorliegenden Studie mit über zwei Jahren kontinuierlich gemessenen, gemittelten Daten aus Kanada (Maldaner et al., 2018) inkl. gemittelte Temperaturen der Umgebungsluft (Luft, °C).

Jahreszeit/ Jahresmittel	Rindviehgülle, Silo ungedeckt diese Studie		Rindviehgülle, Silo ungedeckt Kanada	
	Gülle, °C	Luft, °C	Gülle, °C	Luft, °C
Winter	8.8	1.4	5.9	-7.3
Frühjahr	11.0	10.0	5.2	5.0
Sommer	20.5	19.9	11.8	20.1
Herbst	14.9	9.4	12.0	8.7
Jahresmittel	13.8	10.2	8.7	6.6

Ein Vergleich zwischen mittleren Gülletemperaturen von Schweinegülle, gelagert in einem ungedeckten Silo zwischen Betrieb 4 der vorliegenden Studie mit Daten aus Schweden, die aus einer über ein Jahr dauernden kontinuierlichen Messung von zwei Betrieben stammen (Hung et al., 2024), zeigt um rund 4 bis 6°C höhere Gülletemperaturen für die Verhältnisse in der Schweiz (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**). Ursache der Differenz ist auch hier das kühlere Klima, das in diesem Fall in Schweden vorliegt.

Tabelle 10: Vergleich der mittleren Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) von Schweinegülle gelagert in Silo ungedeckt zwischen den Daten von Betrieb 4 der vorliegenden Studie mit über ein Jahr kontinuierlich gemessenen, gemittelten Daten aus Schweden (Hung et al., 2024) inkl. gemittelte Temperaturen der Umgebungsluft (Luft, ˚C).

Jahreszeit/ Jahresmittel	Schweinegülle, Silo ungedeckt diese Studie		Schweinegülle, Silo ungedeckt Schweden			
	Betrieb 4		Betrieb «VA»		Betrieb «OR»	
	Gülle, ˚C	Luft, ˚C	Gülle, ˚C	Luft, ˚C	Gülle, ˚C	Luft, ˚C
Winter	7.3	1.4	2.8	-2.2	2.8	-2.6
Frühjahr	16.9	10	5.1	5.4	11.8	11.0
Sommer	21.6	19.9	15.4	15.0	17.2	16.2
Herbst	13.9	9.4	8.8	6.2	10.0	6.7
Jahresmittel	14.9	10.2	8.6	6.4	10.7	8.3

Berry et al. (2005) untersuchten die Temperaturen im Headspace eines Güllekanals und in der Gülle eines zwangsgelüfteten, geschlossenen Schweinestalls mit Teilspaltenboden. Die Temperaturen betrugen 20.2˚C im Sommer und 14.9˚C im Winter im Headspace. Die Gülletemperatur lag leicht niedriger mit 19.3˚C bzw. 13.7˚C im Sommer und im Winter. Diese Werte sind leicht tiefer als die Gülletemperaturen der beiden Behälter mit Schweinegülle im Sommer aber wenig bzw. deutlich höher im Winter als die Lagertypen Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung bzw. Silo ungedeckt der vorliegenden Studie. Diese Unterschiede sind aufgrund der unterschiedlichen Lufttemperaturen im Stall und in Aussenlagern zu erwarten.

Tabelle 11 zeigt die mittleren Gülletemperaturen nach Jahreszeit sowie gemittelt über das ganze Jahr geordnet nach Betrieben mit Ställen für Rindvieh mit perforierten und mit planbefestigten Laufflächen. Dabei ist zu beachten, dass Ställe für Rindvieh mit perforierten Laufflächen teilweise auch planbefestigte Flächen im Stallbereich haben. Nur ein Betrieb hatte ausschliesslich perforierte Laufflächen in Stall und Laufhof. Ställe für Rindvieh mit planbefestigten Laufflächen haben abgesehen von Öffnungen in der Abdeckung eines Unterflurlagers, einem Kanal mit perforierter Abdeckung entlang der Fressachse oder Abwurfschächten mit perforierter Abdeckung ausschliesslich planfestigte Flächen. Eine Zusammenfassung mit den wichtigsten Merkmalen der Ställen für Rindvieh mit perforierten bzw. planbefestigten Laufflächen ist Anhang 13 aufgeführt.

Tabelle 11: Mittlere Temperatur der periodisch gemessenen Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) von Betrieben mit einem Stall für Rindvieh mit perforiertem (Betriebe 5, 8, 10, 11) und mit planbefestigtem Boden (Betriebe 2, 6, 7, 9 12) sowie die nach Jahreszeit gemittelten Temperaturen der Umgebungsluft (Luft, ˚C) der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen.

Jahreszeit/ Jahresmittel	n	Ställe für Rindvieh mit perforierten Laufflächen	n	Ställe für Rindvieh mit planbefestigten Laufflächen	Temperatur Umgebungsluft in ˚C
		Temperatur Gülle in ˚C			
Winter	4	8.3	8	8.2	1.4
Frühjahr	3	9.0	7	10.9	10.0
Sommer	4	18.5	8	19.2	19.9
Herbst	4	15.1	8	14.9	9.4
Jahresmittel		12.7		13.3	10.2

Die Unterschiede der Gülletemperaturen zwischen Betrieben mit Ställen für Rindvieh mit perforierten und mit planbefestigten Laufflächen sind gering mit tendenziell höheren

Werten für die Letzteren. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten kann man jedoch nicht von einem systematischen Unterschied ausgehen.

Die Gülletemperatur in einem mit Spalten abgedeckten Kanal von rund 1.5 m Breite und 1 m Tiefe entlang der Fressachse gemessen auf Betrieb 12 unterschied sich mit einer mittleren Jahrestemperatur von 11.9°C wenig von derjenigen von Ställen für Rindvieh mit perforierten Laufflächen.

Tabelle 12 zeigt die Gülletemperaturen gemittelt über das ganze Jahr von Betrieben mit mehr als einem Güllelager. Das Endlager wies mit Ausnahme von einem Betrieb leicht höhere Temperaturen als das erste Lager auf. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten kann man auch hier nicht von einem systematischen Unterschied ausgehen. Zu beachten ist, dass bei den Betrieben 4 und 9 eine Messung im Frühjahr der Vorgrube (1. Lager) und bei Betrieb 9 auch des Endlagers fehlt. Dies führt zu einer leicht erhöhten mittleren Jahrestemperatur.

Tabelle 12: Mittlere Jahrestemperatur (Winter, Frühjahr, Sommer, Herbst) der periodisch gemessenen Gülletemperaturen (Gülle, °C) von Betrieben mit zwei Güllelagern. Alle Betriebe haben Rindviehgülle ausser die Lager von Betrieb 4 (Schweinegülle) sind der Tabellenfussnote aufgelistet. Be. bezeichnet die Betriebsnummer.

Be.	1.Lager	Endlager	1.Lager	Endlager
11	Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung	Unterflurlager mit fester Abdeckung	12.1	12.7
2	Unterflurlager mit fester Abdeckung	Silo ungedeckt	11.7	13.3
9	Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung*	Silo ungedeckt*	16.9	15.8
4	Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung*,**	Silo ungedeckt**	17.9	14.9
12	Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung	Silo mit Zeltabdeckung	13.4	15.4

* Temperaturmessung nur von Winter, Sommer, Herbst

**Schweinegülle

Die Daten in Tabelle 11 und Tabelle 12 weisen darauf hin, dass bei Rindviehställen mit freier Lüftung die Güllelagerung ausserhalb des Stalls in einer kühleren Umgebung nicht zwingend zu einer tieferen Gülletemperatur gegenüber der Lagerung im Stallbereich bzw. unter dem Laufhof führt. Dies trotz der gegenüber der Umgebungstemperatur um 2 bis 3°C erhöhten Temperaturen in Stall und Laufhof, die man aufgrund der Messdaten der Betriebe 11 und 12 erwarten kann (Kap. 3.4.1.3, Anhang 11). Für geschlossene Schweineställe mit Zwischenlagerung der Gülle im Güllekeller des Stalls wurde hingegen eine höhere Temperatur beobachtet als im Endlager (Dalby et al., 2023) aufgrund der höheren Lufttemperatur im Stall. Die höhere Gülletemperatur in der Vorgrube von Betrieb 4 mit geschlossenem Zuchtschweinestall bestätigt diesen Zusammenhang zwischen höherer Lufttemperatur in geschlossenem Stall und hoher Gülletemperatur.

3.5 Schätzung der Methanemissionen basierend auf der Lufttemperatur und der gemessenen Gülletemperatur

Die Schätzung der Methanemissionen gemäss Methodik beschrieben in Kap. 2.8 basierend auf der Gülletemperatur führt bei beiden Betrieben zu höheren Werten als bei Verwendung der Lufttemperatur (Abbildung 14). Die Differenz beträgt 5% und 36% für Betrieb 11 bzw. 12 (Daten in Tabelle 18, Anhang 14). Der Unterschied ist auf die höhere Gülletemperatur in Herbst und Winter zurückzuführen. Bei Betrieb 12 liegen ausser im Juni die Gülletemperaturen in allen Monaten höher als die Lufttemperaturen, was die vergleichsweise höhere Differenz zur Berechnung mittels Lufttemperatur erklärt. Die erhöhten Gülletemperaturen dürften hauptsächlich mit der Zeltdachabdeckung zusammenhängen.

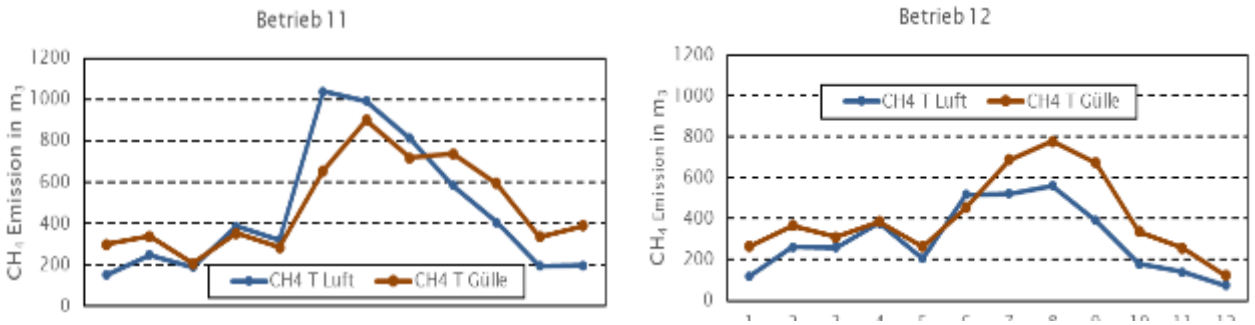


Abbildung 14: Verlauf Methanemissionen der Güllelager 1 von Betrieb 11 und 12 geschätzt basierend auf Lufttemperatur und Gülletemperatur.

3.6 Protokoll für Temperaturmessungen von Güllelagern: Empfehlungen

Trotz der in Kap. 3.3.2 diskutierten Diskrepanzen zwischen der kontinuierlichen und periodischen Messung können beide Methoden zur Erfassung von Gülletemperaturen von Güllelagern empfohlen werden, sofern eine Unsicherheit der ermittelten Gülletemperaturen von 1 bis 3°C akzeptiert werden kann. Dabei ist anzumerken, dass in den bisher vorliegenden Studien (z.B. Hung et al., 2024; VanderZaag et al., 2026) die Repräsentativität der Messpositionen für die Gülletemperatur des gesamten Inhalts der Lager nicht systematisch überprüft wurde. Vermutlich ist allgemein mit einer Unsicherheit von aktuell vorliegenden Werten für Gülletemperaturen von ca. 1°C zu rechnen.

Eine kontinuierliche Messung ist grundsätzlich vorzuziehen, ist in der Praxis jedoch schwierig umsetzbar, da ein grosses Entgegenkommen der landwirtschaftlichen Betriebe erforderlich ist (Risiko von Schäden an Einrichtungen aufgrund von Einführen von Ketten und Gewichtssteinen in ein Güllelager). Kontinuierliche Messungen dürften daher nur in wenigen Fällen realisierbar sein.

Für Messkampagnen mit fix installierten Messsensoren wäre grundsätzlich eine Anordnung mit einem Schwimmer und daran fixierten Messsonden zu empfehlen (z.B. wie in Hung et al., 2024). Dadurch würde die Schwierigkeit der Unterscheidung von Zeitfenstern mit Messung der Temperatur von Luft und Gülle entfallen. Allerdings dürfte dies unter schweizerischen Verhältnissen mit häufiger Durchmischung der Gülle und Abdeckung der Güllelager kaum umsetzbar sein. Bei Fixierung der Messeinrichtung am Boden eines Güllelagers wie in der vorliegenden Studie ist zu empfehlen, die Sonden näher am Boden des Lagers zu installieren. Abbildung 11 zeigt, dass bei Lager 1 von Betrieb 11 der Füllstand mehrheitlich niedriger als 1.5 m war. Bei Betrieb 12 beträgt die Mehrzahl der Werte 1.0 m oder weniger. Tabelle 13 bestätigt einen mehrheitlich niedrigen Füllstand: 17 Lager, von welchen manuelle Füllstandsmessungen vorliegen, weisen mehrheitlich, d.h. zu 69% Werte von weniger als 1.5 m Füllstand auf. 45% der Daten sind kleiner als 1.00 m und nur 31% der manuellen Messungen weisen einen Füllstand von 1.50 m und mehr auf. Kupper et al. (2021a,b) fanden ebenfalls mittlere Füllstandswerte von weniger als 1.50 m bei einem Güllesilo. Kontinuierliche Füllstandsmessungen mit einer Anordnung bei 0.5, 1.0 und 1.5 m ab Boden wären daher besser geeignet, um die Gülletemperatur eines Lagers unter solchen Bedingungen zu erfassen.

Soweit möglich sollten die Sensoren in einem Abstand von mehreren Metern von einer Wand des Güllelagers platziert werden. In der Praxis dürfte dies oft nicht möglich sein. Die Messdaten der vorliegenden Studie suggerieren, dass auch mit einer Platzierung der Sonden in der Nähe einer Wand eines Güllelagers die Generierung korrekter Messdaten möglich ist. Zusätzliche periodische Messungen von Hand wie durchgeführt in der vorliegenden Studie zur Überprüfung der Repräsentativität der mittels kontinuierlicher Messung generierten Messdaten sollten in jedem Fall durchgeführt werden.

Tabelle 13: Verteilung der in 17 Güllelagern periodisch gemessenen Füllstandswerte. Anzahl Messungen total: 210. Nach Jahreszeit und pro Jahr gemittelte, periodisch gemessene Füllstandswerte je Lager in Anhang 12.

Füllstand in m	Anzahl	Anteil	Füllstand in m	Anteil
≥0.00-<0.25	5	2%	≥0.00-<0.50	22%
≥0.25-<0.50	13	6%		
≥0.50-<0.75	28	13%	≥0.50-<1.00	23%
≥0.75-<1.00	14	7%		
≥1.00-<1.25	35	16%	≥1.00-<1.50	24%
≥1.25-<1.50	21	10%		
≥1.50-<1.75	29	14%	≥1.50	31%
≥1.75-<2.00	15	7%		
≥2.00-<2.25	11	5%		
≥2.25-<2.50	11	5%		
≥2.50-<2.75	10	5%		
≥2.75-<3.00	4	2%		
≥3.00	14	7%		

Bei Durchführung periodischer Messungen dürfte eine monatliche Messkampagne aufgrund der langsamen und kontinuierlichen Änderung der Gülletemperaturen ausreichend genaue Resultate liefern. Aufgrund der konstant verlaufenden Änderung der Gülletemperatur und dem charakteristischen Profil im Jahresverlauf sollte der zeitliche Abstand zwischen den Messungen konstant gehalten werden. Aufgrund der kleinen und nicht systematischen Streuung zwischen den verschiedenen Messpunkten dürften 3 Messpositionen ausreichen. Die Messung in drei Tiefen und eine Messdauer von rund 20 Sekunden pro Messpunkt sollte bei Verwendung von TC01 Sensoren beibehalten werden. Streng genommen wären Messungen über mehrere Jahre erforderlich, da Gülletemperaturen und Methanemissionen für unterschiedliche Jahre starke Schwankungen aufweisen können (VanderZaag et al., 2026).

Sowohl bei kontinuierlichen als auch bei periodischen Messungen ist die Installation eines Füllstandssensors zu empfehlen. Damit lässt sich die vorhandene Güllemenge für Modellrechnungen zur Schätzung von Methanemissionen bestimmen. Die Installation von Füllstandssensoren ist im Gegensatz zu Temperatursensoren in der Gülle in der Praxis wenig problematisch und bringt kaum Einschränkungen oder Mehraufwand bei den täglichen Arbeiten auf den Betrieben. Weiter ist auch zu empfehlen, Zeitpunkte und Dauer der Durchmischung der Güllelager durch die Betriebe erfassen zu lassen. Damit liesse sich besser abschätzen, inwieweit ein Temperaturgradient in einem Güllelager vorliegt, und damit die Unsicherheit der Messdaten besser einordnen.

Die verwendeten Messgeräte und die Datenübertragung auf Grafana haben sich bewährt und können zur Verwendung solcher Messungen empfohlen werden. Messung und Datenübertragung mit den in den periodischen Messungen eingesetzten Temperatursensoren des Typs TC01 war ebenfalls befriedigend. Im Nachhinein nicht erklärbare Datenausfälle kamen nur in wenigen Messkampagnen vor. Um dies zu vermeiden, sollte jeweils vor jeder Messkampagne die Datenübertragung vor Ort überprüft werden. Vor und nach einer Messkampagne über ein Jahr sollte ein Quervergleich der Messsonden unter Temperatur-kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine Methodik zur Bestimmung der Gülletemperatur unter den Bedingungen der Schweiz erarbeitet, unter welchen sich Messgeräte nur schwer fest installieren lassen (häufiges Durchmischen der Gülle, Abdeckung der Güllelager). Die Genauigkeit und die Funktion der Geräte während der Messkampagnen und die Datenübertragung waren ausreichend.

Die räumliche Variabilität der Gülletemperaturen innerhalb der Lager war begrenzt. Daraus lässt sich schliessen, dass die Gülletemperatur mit einem Messpunkt relativ genau bestimmt werden kann. Mit den beiden Methoden kontinuierliche und periodische Messung liess sich die Gülletemperatur mit einer geschätzten Unsicherheit von 1˚C bis 3˚C bestimmen.

Die Gülletemperatur zeigte einen Jahresgang mit längerfristigen Temperaturschwankungen und einem Minimum im Winter bzw. im Monat Januar sowie einem Anstieg bis zum Maximum im Sommer bzw. Monat August. Die Umgebungstemperatur wies ein ähnliches Profil auf, jedoch mit kurzfristigen Schwankungen wie beispielsweise einem typischen Tagesgang. Die Gülletemperatur lag im Winter über und im Sommer niedriger im Vergleich zur Umgebungstemperatur. Im Herbst trat eine Überhöhung der Gülletemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur auf. Solche Temperaturverläufe weisen auch bereits publizierte Studien auf. Die Jahresmittelwerte der Gülletemperaturen der untersuchten Lager zeigten eine Überhöhung gegenüber der mittleren Lufttemperatur von rund 2˚C für die Unterflurlager. Für Vorgruben und Silos betrug die Überhöhung rund 3.5˚C bis 5˚C.

Die Güllelager zeigten bei den kontinuierlichen Messungen einen Temperaturgradienten: bei Umgebungstemperaturen, die niedriger waren als die Gülletemperatur, wurde die Gülle von der Oberfläche her abgekühlt und umgekehrt bei Umgebungstemperaturen grösser als die Gülletemperatur. Ein analoges Muster war bei den periodischen Messungen deutlich weniger ausgeprägt oder gar nicht feststellbar. Der Einfluss dieses Gradienten auf die mittlere Gülletemperatur war jedoch bei den beiden Betrieben mit kontinuierlichen Messungen klein, da der Füllstand überwiegend niedrig war und somit die Gülletemperatur mit dem Sensor unten, d.h. 50 cm ab Boden der Güllelager, wahrscheinlich ausreichend genau erfasst werden konnte.

Die Verwendung der Gülletemperatur anstelle der Lufttemperatur für die Schätzung der Methanemissionen für die kontinuierlich gemessenen Güllelager führte zu höheren Emissionen (plus 5% und 36% für Betrieb 11 bzw. 12). Dies suggeriert, dass mit der aktuellen Methodik basierend auf der Lufttemperatur die Methanemissionen aus der Güllelagerung eher unterschätzt werden.

Für eine Verwendung der Gülletemperatur anstelle der Lufttemperatur für die Modellierung von Methanemissionen sind deutlich mehr Messdaten erforderlich. Diese könnten mittels kontinuierlicher oder periodischer Messungen erhoben werden. Für kontinuierliche Messungen ist eine Anordnung der Messgeräte bei 0.5, 1.0 und 1.5 m ab Boden unter Bedingungen der Schweiz zu empfehlen. Periodische Messungen könnten im Rahmen von Semester oder Bachelorarbeiten oder möglicherweise auch im Rahmen von Citizen Science Projekten relativ kostengünstig durchgeführt werden. Zum besseren Verständnis der Temperaturen in Güllelagern sind gezielte Untersuchungen der Gülletemperatur im Zusammenhang mit Durchmischung der Gülle und zu Temperaturgradienten mit feinerer Auflösung der Messtiefen zu empfehlen.

5. Verdankungen

Wir bedanken uns bestens bei den landwirtschaftlichen Betrieben für die freundliche und unkomplizierte Zusammenarbeit, die Bereitstellung ihrer Betriebe mit freiem Zutritt zu Güllelagern, Ställen und Ausläufen für die Durchführung der Messungen sowie von Betriebsdaten.

Michael Trinkwitz danken wir für seine Mitwirkung an den periodischen Messungen auf den Betrieben.

6. Literaturverzeichnis

BAFU. 2018. Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO2-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020). Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.

BAFU, BLW. 2011. Baulicher Umweltschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Teilrevidierte Ausgabe 2023. Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bundesamt für Landwirtschaft, BLW, Bern.

Balde, H., VanderZaag, A.C., Burtt, S., Evans, L., Wagner-Riddle, C., Desjardins, R.L., MacDonald, J.D. 2016a. Measured versus modeled methane emissions from separated liquid dairy manure show large model underestimates. Agr. Ecosyst. Environ. 230: 261-270.

Balde, H., VanderZaag, A.C., Burtt, S.D., Gordon, R.J., Desjardins, R.L. 2016b. Does fall removal of the dairy manure sludge in a storage tank reduce subsequent methane emissions? J. Environ. Qual. 45(6): 2038-2043.

Berry, N., Zeyer, K., Emmenegger, L., Keck, M. 2005. Emissionen von Staub (PM10) und Ammoniak (NH3) aus traditionellen und neuen Stallsystemen mit Untersuchungen im Bereich der Mastschweinehaltung. Dübendorf: Agroscope FAT Tänikon, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, CH-8356 Ettenhausen, Empa, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf.

Bretscher, D. 2019. Agricultural CH4 and N2O emissions in Switzerland: QA/QC. Internal documentation (update July 2019). CH-8046 Zürich: Agroscope Reckenholz Tänikon Research Station (ART) Air Pollution / Climate Group.

Dalby, F.R., Hafner, S.D., Petersen, S.O., Vanderzaag, A., Habtewold, J., Dunfield, K., Chantigny, M.H., Sommer, S.G. 2021a. A mechanistic model of methane emission from animal slurry with a focus on microbial groups. PLoS One 16(6): 22.

Dalby, F.R., Hafner, S.D., Petersen, S.O., VanderZaag, A.C., Habtewold, J., Dunfield, K., Chantigny, M.H., Sommer, S.G. 2021b. Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. J. Environ. Qual. 50(4): 817-835.

Dalby, F.R., Hansen, M.J., Guldberg, L.B., Hafner, S.D., Feilberg, A. 2023. Simple management changes drastically reduce pig house methane emission in combined experimental and modeling study. Environ. Sci. Technol. 57(9): 3990−4002.

Genedy, R.A., Ogejo, J.A. 2026. Spatiotemporal variability of dairy manure temperature during storage in earthen pits: Associations with meteorological factors. PLOS ONE 21(5): e0347665.

Hafner, S.D., Mjöfors, K. 2023. STM: A software tool for predicting daily temperature in stored animal slurry. SoftwareX 22: 101354.

Harzer, H., Heidenreich, T., Vogel, I., Rothe, F., Fröhlich, M. 2025. Einfluss der natürlichen Schwimmschicht auf die Emissionen bei der Lagerung von Rindergülle und -gärrest in offenen Behältern. Schriftenreihe Heft 14/2025. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen (https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/47624/documents/73253 23.03.2026).

Hung, C.-Y., Mjöfors, K., Rennie, T., Grant, B., Smith, W., VanderZaag, A. 2024. Manure temperature prediction for slurry storage in Sweden: Model validation including effects of shading, snow cover and mixing. Biosys. Eng. 243: 70-81.

IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland. Copyright by The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019. https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/ [05.02.2024].

Kariyapperuma, K.A., Johannesson, G., Maldaner, L., VanderZaag, A., Gordon, R., Wagner-Riddle, C. 2018. Year-round methane emissions from liquid dairy manure in a cold climate reveal hysteretic pattern. Agric. For. Meteorol. 258: 56-65.

Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A.C., Gordon, R., Duke, C. 2018. Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility. Agric. For. Meteorol. 258: 96-107.

Kupper, T., Eugster, R., Sintermann, J., Häni, C. 2021a. Ammonia emissions from an uncovered dairy slurry storage tank over two years: Interactions with tank operations and meteorological conditions. Biosyst. Eng. 204: 36-49.

Kupper, T., Eugster, R., Sintermann, J., Neftel, A., Häni, C. 2021b. A novel approach to estimate the abatement of ammonia emissions from mitigation techniques at farm-scale slurry stores exemplified by a semifloating cover. J. Environ. Qual. 50(5): 1074-1083.

Kupper, T., Häni, C., Bretscher, D., Zaucker, F. 2022. Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020 URL: http://www.agrammon.ch/dokumente-zum-download/. Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen.

KVU-KOLAS. 2022. Abdeckung von Güllelagern zur Reduktion von Emissionen. Merkblatt von KOLAS und KVU

Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A.C., Gordon, R., Duke, C. 2018. Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility. Agric. For. Meteorol. 258: 96-107.

Mangino, J., Bartram, D., Brazy, A. 2001. Development of a methane conversion factor to estimate emissions from animal waste lagoons.

Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähner, 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 4/1-4/24.

Schweizerischer Bundesrat. 2026. Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16.Dezember 1985 (1. Januar 2026). Bern:

VanderZaag, A.C., Glenn, A., Balde, H. 2022. Manure methane emissions over three years at a swine farm in western Canada. J. Environ. Qual. 51(3): 301-311.

VanderZaag, A., Baldé, H., Flesch, T.K., Hung, C.-Y., Wagner-Riddle, C. 2026. Heat waves associated with higher methane emissions from dairy manure: A 6-year study. Agricult. Forest Meteorol. 378: 110980.

Anhang 1

Für die Messungen eingesetzten Geräte

Geräte/Zweck	Gerätetyp	
Gülletemperatur kontinuierlich	LTC2 -- Industrial LoRaWAN Temperature Transmitter	
Gülletemperatur periodisch	TC01-LB LoRaWAN Thermocouple Converter Node 868MHz	
Umgebungstemperatur kontinuierlich/periodisch	S31-CB/S31B-CB -- NB-IoT/LTE-M Outdoor Temperature and Humidity Sensor	
Füllstand Güllelager kontinuierlich	DDS75-NB -- NB-IoT Distance Detection Sensor	
Zeitstempel	WisNode LoRa Button 4K	 
Datenübertragung auf Grafana	LPS8N Indoor LoRaWAN Gateway	

Anhang 2

Zeitfenster mit Erfassung von Gülletemperaturen Betrieb 11

Unten, Mitte, Oben steht für die Messpositionen der Temperatursensoren gemäss Beschreibung von Kap. 2.5.

Von Datum	Von Zeit	Bis Datum	Bis Zeit	Unten	Mitte	Oben	Unten	Mitte	Oben
				Position*			Messgerät		
11.11.2024	15.00	29.11.2024	17.00	g	h	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
29.11.2024	17.00	04.12.2024	3.00	g	g	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
04.12.2024	3.00	07.12.2024	1.00	g	h	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
03.01.2025	0.00	12.01.2025	10.00	v	g	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
12.01.2025	10.00	15.01.2025	18.00	g	g	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
15.01.2025	18.00	17.01.2025	13.00	g	g	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
17.01.2025	16.08	30.01.2025	0.00	v	g	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
30.01.2025	0.00	10.02.2025	8.56	v	g	h	LTC1-1	TC1-2	LTC1-12
10.02.2025	10.42	15.02.2025	16.10	g	g	g	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
15.02.2025	16.10	07.03.2025	7.01	g	g	h	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
07.03.2025	7.01	17.04.2025	10.00	g	h	h	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
17.04.2025	10.00	23.04.2025	0.00	g	g	h	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
23.04.2025	0.00	08.05.2025	7.48	g	g	h	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
08.05.2025	8.40	09.05.2025	14.10	g	h	h	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
13.05.2025	8.20	29.05.2025	11.30	g	h	h	LTC1-3	TC1-2	LTC1-12
06.06.2025	15.00	13.06.2025	14.45	g	h	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
13.06.2025	14.45	25.06.2025	8.00	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
25.06.2025	8.00	21.08.2025	10.35	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
21.08.2025	11.00	09.09.2025	11.20	g	h	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
09.09.2025	11.50	25.09.2025	14.45	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
25.09.2025	15.05	29.09.2025	10.20	g	h	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
29.09.2025	10.20	24.10.2025	0.00	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
24.10.2025	0.00	28.10.2025	17.00	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
28.10.2025	17.00	13.11.2025	5.10	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
13.11.2025	6.30	01.01.2026	17.30	g	h	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
02.01.2026	10.50	13.01.2026	20.30	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
13.01.2026	20.30	17.01.2026	19.00	g	g	g	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
17.01.2026	19.00	20.01.2026	15.00	g	g	g	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10
20.01.2026	15.00	06.02.2026	8.30	g	g	h	LTC1-2	TC1-3	LTC1-10

*Positionen der Temperatursensoren: g: in Gülle; h: im Headspace; v: verwerfen

Zeitfenster mit Erfassung von Gülletemperaturen Betrieb 12

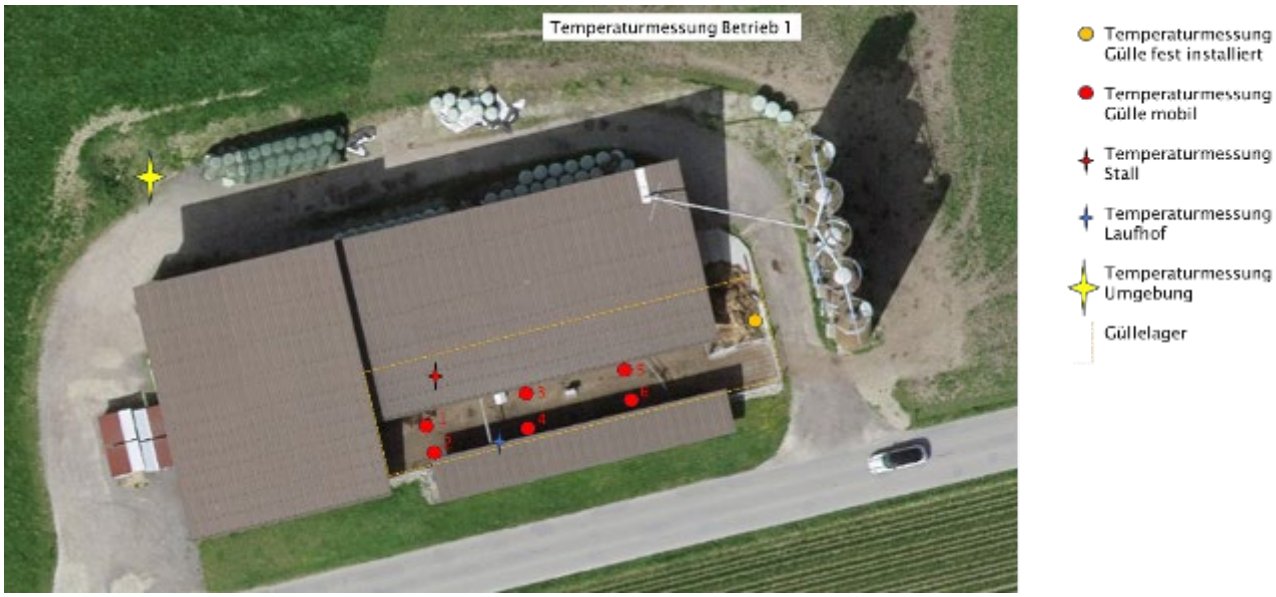
Unten, Mitte, Oben steht für die Messpositionen der Temperatursensoren gemäss Beschreibung von Kap. 2.5.

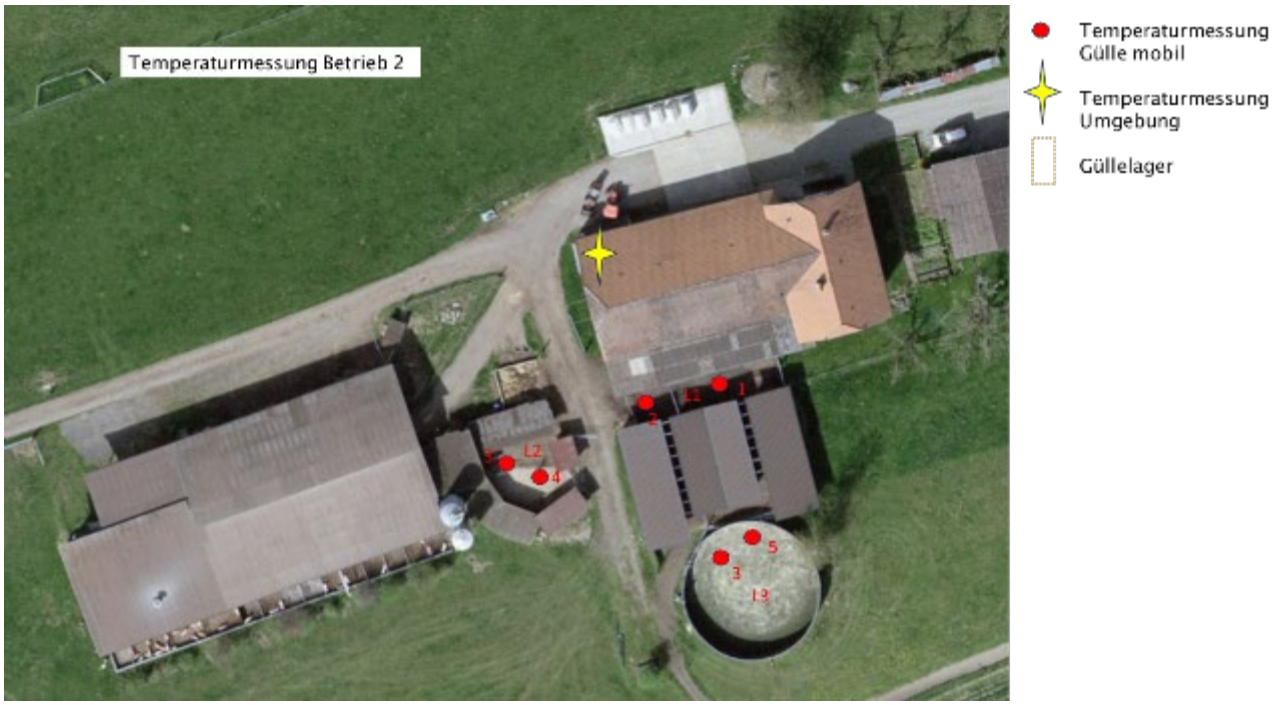
Von Datum	Von Zeit	Bis Datum	Bis Zeit	Unten	Mitte	Oben	Unten	Mitte	Oben
				Position*			Messgerät		
14.11.2024	14.00	11.12.2024	7.00	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
19.12.2024	10.00	12.01.2025	0.00	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
12.01.2025	0.00	17.01.2025	8.05	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
17.01.2025	10.10	01.03.2025	6.30	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
08.03.2025	15.30	17.03.2025	14.50	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
17.03.2025	14.50	01.04.2025	9.50	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
01.04.2025	9.50	07.04.2025	7.00	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
07.04.2025	11.10	16.04.2025	9.00	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
16.04.2025	9.00	25.04.2025	8.00	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
25.04.2025	8.00	09.05.2025	10.15	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
09.05.2025	10.15	12.05.2025	6.30	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
16.05.2025	16.20	31.07.2025	8.00	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
31.07.2025	8.00	15.08.2025	10.42	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
15.08.2025	10.42	18.08.2025	8.00	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
18.08.2025	8.00	20.08.2025	8.40	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
27.08.2025	10.40	17.10.2025	6.50	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
17.10.2025	8.00	20.10.2025	5.00	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
29.10.2025	15.20	24.11.2025	7.45	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
24.11.2025	9.00	05.12.2025	8.50	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
30.12.2025	9.50	28.01.2026	14.30	g	h	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4
28.01.2026	14.30	06.02.2026	9.00	g	g	h	ltc1-5	ltc1-9	ltc1-4

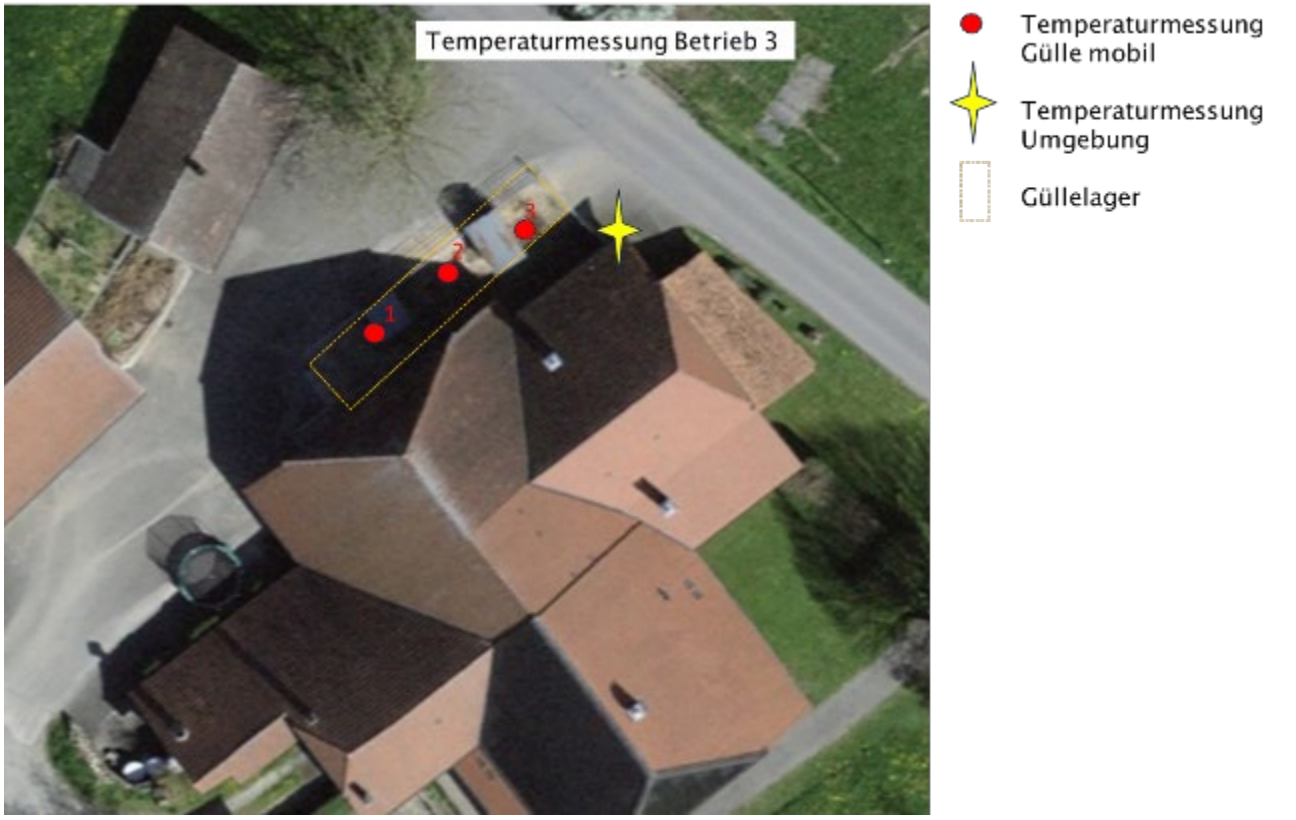
* der Temperatursensoren: g: in Gülle; h: im Headspace; v: verwerfen

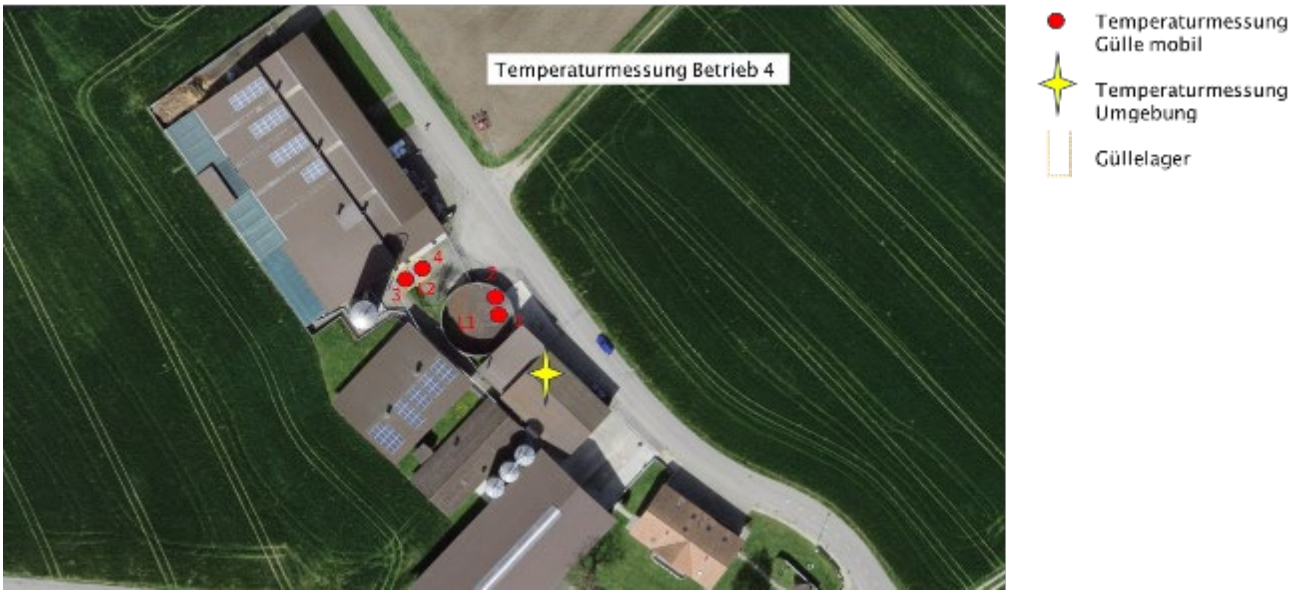
Anhang 3

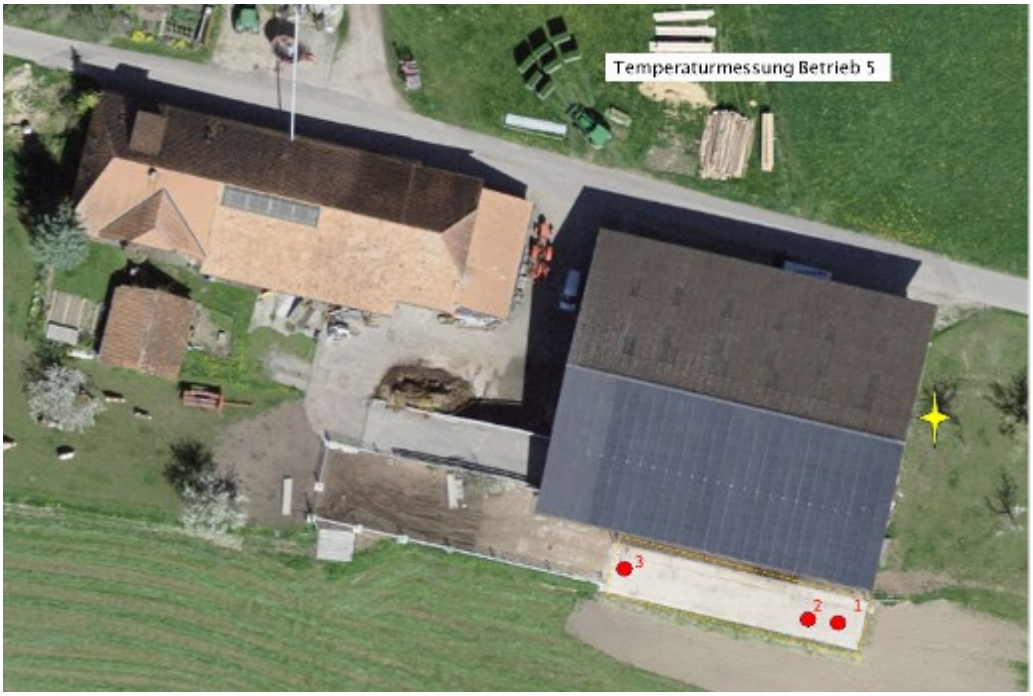
Positionen der Messgeräte auf den Betrieben 1 bis 12






Temperaturmessung Betrieb 3
1
2
3
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager

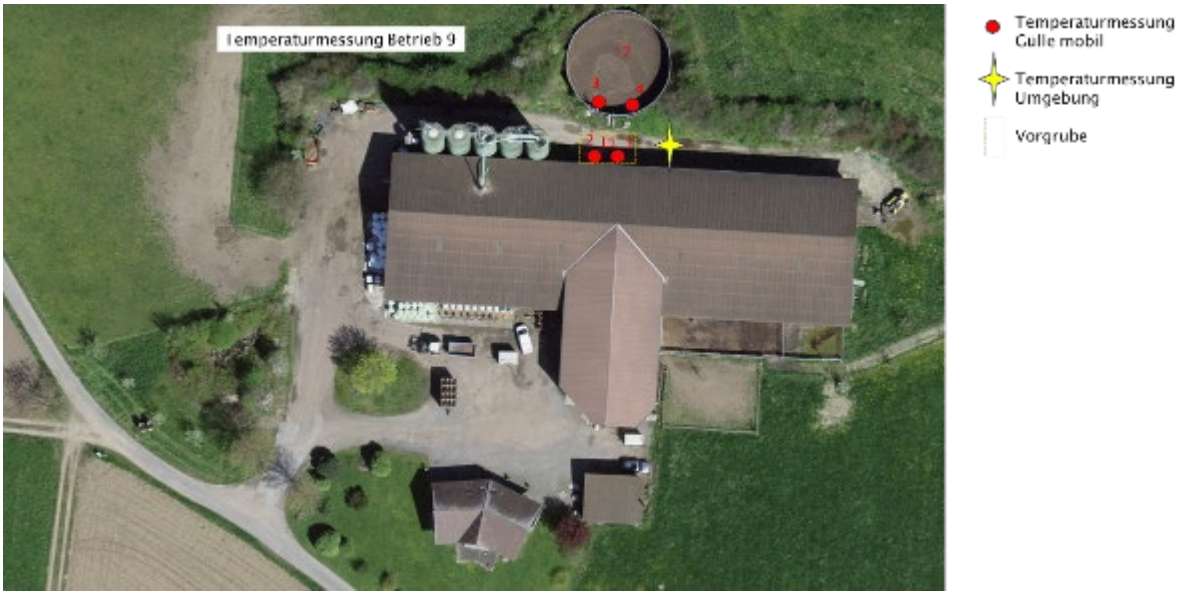

Temperaturmessung Betrieb 4
1
2
3
4
L1
L2
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager

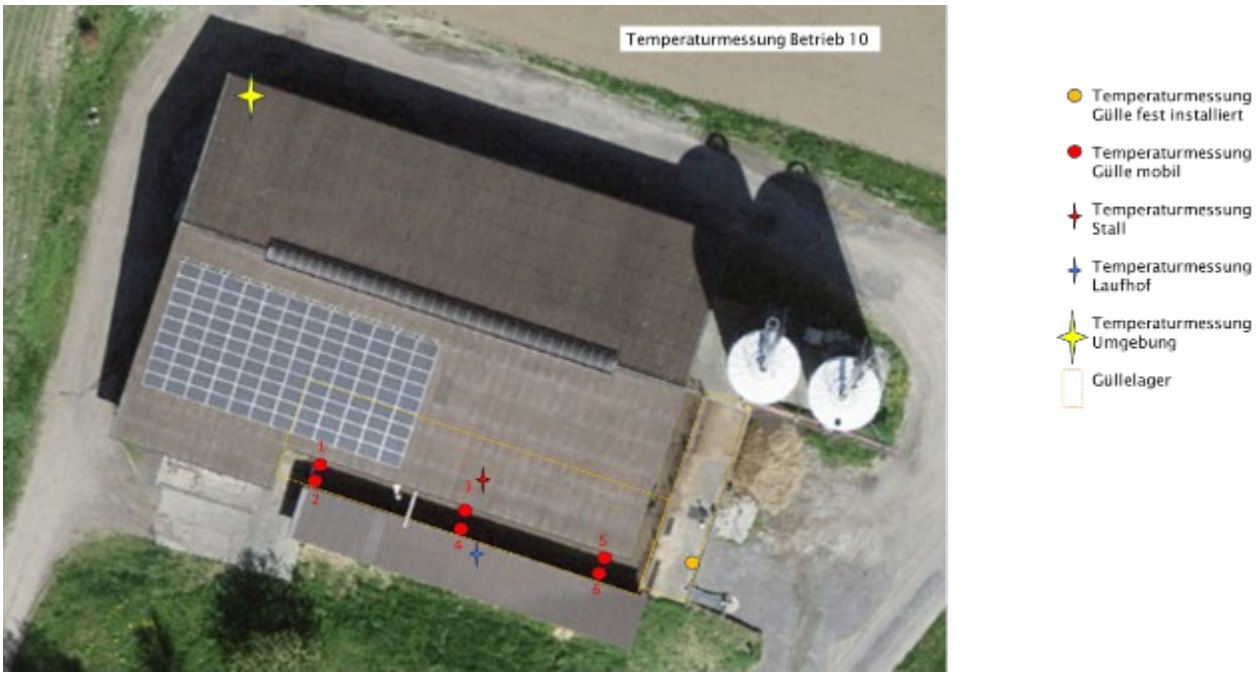

Temperaturmessung Betrieb 5
3
2
1
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager

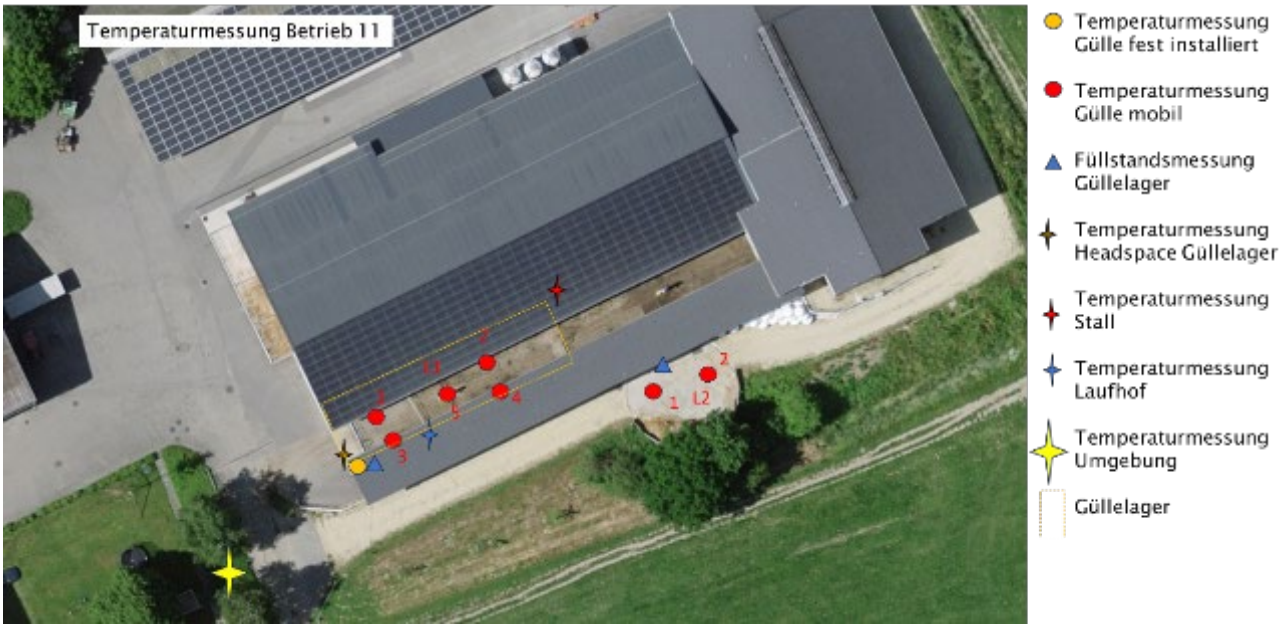

Temperaturmessung Betrieb 6
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager

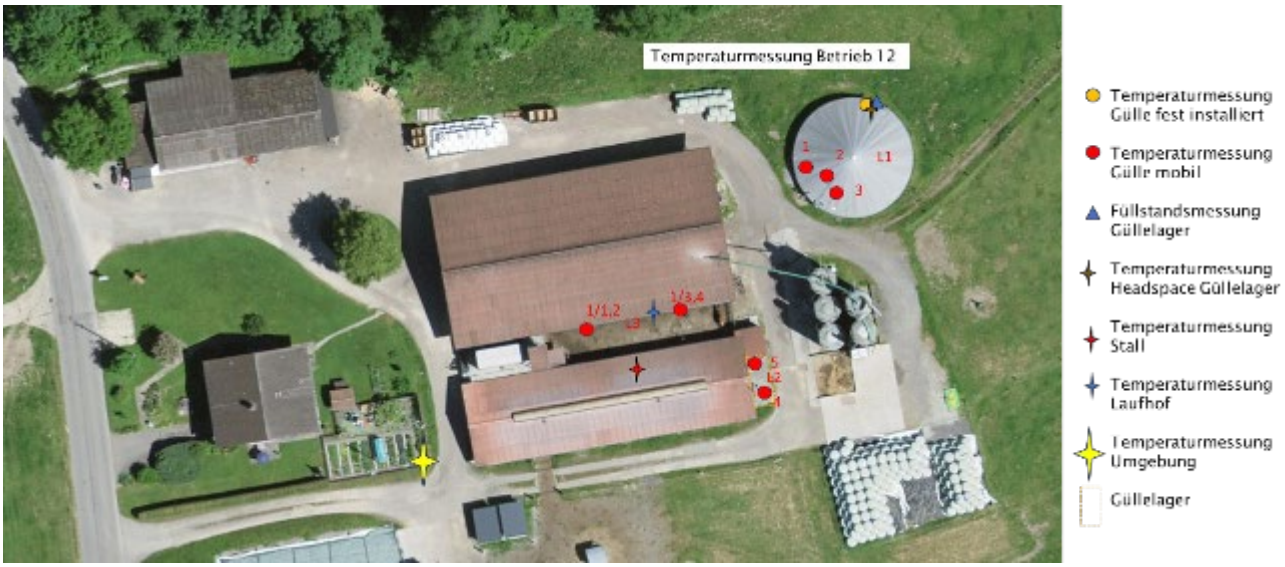

Temperaturmessung Betrieb 7
2
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager


Temperaturmessung Betrieb 8
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager


Temperaturmessung Betrieb 9
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Umgebung
Vorgrube


Temperaturmessung Betrieb 10
Temperaturmessung Gülle fest installiert
Temperaturmessung Gülle mobil
Temperaturmessung Stall
Temperaturmessung Laufhof
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager


Temperaturmessung Betrieb 11
Temperaturmessung Gülle fest installiert
Temperaturmessung Gülle mobil
Füllstandsmessung Güllelager
Temperaturmessung Headspace Güllelager
Temperaturmessung Stall
Temperaturmessung Laufhof
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager


Temperaturmessung Betrieb 12
Temperaturmessung Gülle fest installiert
Temperaturmessung Gülle mobil
Füllstandsmessung Güllelager
Temperaturmessung Headspace Güllelager
Temperaturmessung Stall
Temperaturmessung Laufhof
Temperaturmessung Umgebung
Güllelager

Anhang 4

Ergebnisse der Gülletemperaturmessungen der Testphase von Betrieb 1

Im Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung für Rindviehgülle von Betrieb 1 variierte zu Beginne die Gülletemperatur parallel mit der Umgebungstemperatur. Dies ist durch die fehlende Fixierung von Kette/Temperatursensor zu erklären, was dazu führte, dass der Sensor an der Oberfläche aufschwamm und die Gülletemperatur unzureichend erfasste. Nach der Fixierung des Sensors an Kette und Gewicht an deren unteren Ende wie beschrieben in Kap. 3.1.1.1 liess sich die Gülletemperatur auf der gewünschten Tiefe im Lager erfassen. Dies ist aus dem Verlauf der Gülletemperatur ersichtlich, die nach der Befestigung, die keinen Tagesgang mehr zeigte, und nur langsam bzw. kontinuierlich anstieg (Abbildung 15). Tabelle 14 zeigt Mittelwerte, Minimum und Maximum von Gülletemperatur und Umgebungstemperatur vor und nach Befestigung des Sensors.

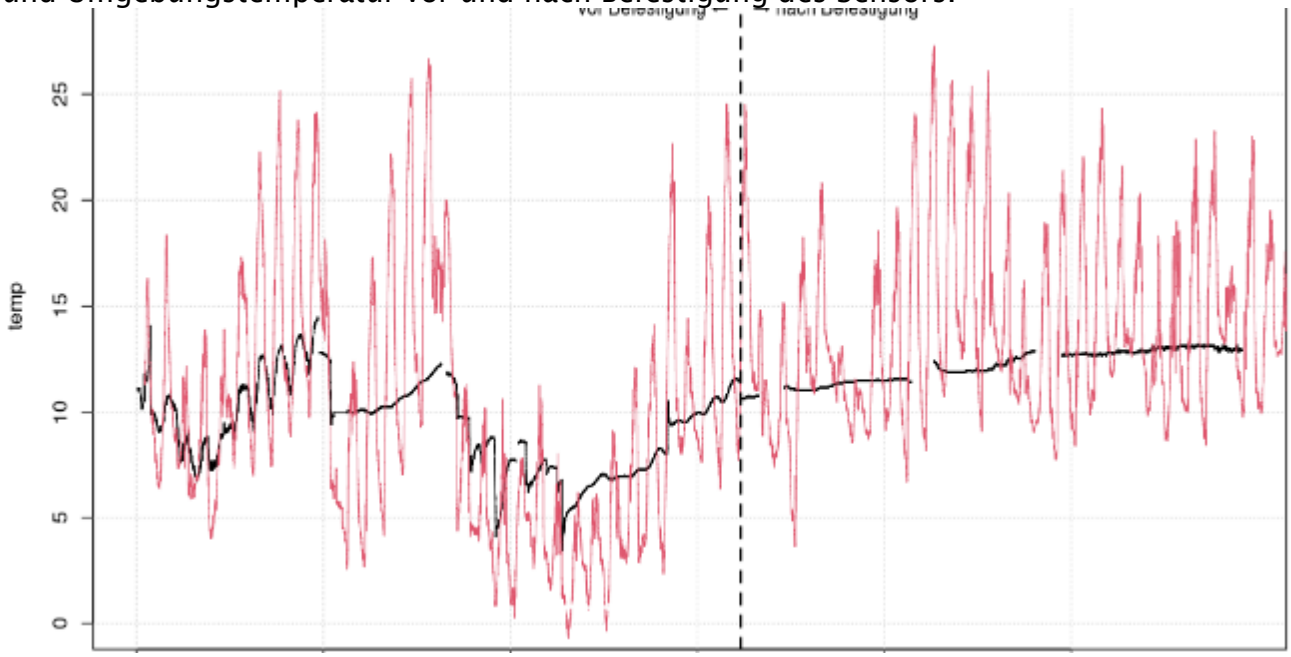


Abbildung 15: Verlauf der kontinuierlich gemessenen Gülletemperatur (schwarze Linie) von Betrieb 1 mit Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung (Rindviehgülle) sowie die Lufttemperatur der Umgebungsluft (rote Linie; gemessen am Standort des Betriebs mit S31 Sensor), im Frühjahr 2024 vor und nach Befestigung des Sensors wie beschrieben in Kap. 3.1.1.1.

Tabelle 14: Kontinuierlich gemessene Gülletemperatur von Betrieb 1 mit Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung (Rindviehgülle) sowie Umgebungstemperatur (gemessen am Standort des Betriebs mit S31 Sensor), im Frühjahr 2024, vor und nach Befestigung des Sensors wie beschrieben in Kap. 3.1.1.1.

Vor Befestigung	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gülletemperatur in ˚C	9.2	3.4	14.4
Umgebungstemperatur in ˚C	9.9	-0.8	26.9
Differenz Gülletemperatur – Umgebungstemperatur in ˚C	-0.6	-15.4	7.5
Nach Befestigung			
Gülletemperatur in ˚C	9.2	3.4	14.4
Umgebungstemperatur in ˚C	9.9	-0.8	26.9
Differenz Gülletemperatur – Umgebungstemperatur in ˚C	-0.6	-15.4	7.5

Anhang 5

Ergebnisse der Gülletemperaturmessungen der Testphase von Betrieb 6

Im Silo ungedeckt zur Lagerung von Gärgülle von Betrieb 6 variierte die Gülletemperatur parallel zur Umgebungstemperatur. Nach der Fixierung des Sensors an Kette und Gewicht an deren unteren Ende wie beschrieben in Kap. 3.1.1.1 liess sich die Gülletemperatur wie bei Betrieb 1 auf der gewünschten Tiefe im Lager erfassen. Die starken Schwankungen der Gülletemperatur mit einem steilen Anstieg und anschliessendem Abfall sind die Folge der Anlieferung von Gärgülle, welche eine Temperatur von deutlich über 30°C bis gegen ca. 40°C aufwies. Das Zeitfenster zwischen ca. 20.04. und Ende April zeigt Gülletemperaturen von rund 10°C. Hier war der Füllstand niedrig und es erfolgten keine Anlieferungen von Gärgülle, was die relativ niedrige Gülletemperatur erklärt (Abbildung 16). Tabelle 15 zeigt Mittelwerte, Minimum und Maximum von Gülletemperatur und Umgebungstemperatur vor und nach Befestigung des Sensors.



Abbildung 16: Verlauf der kontinuierlich gemessenen Gülletemperatur (schwarze Linie) von Betrieb 6 mit Silo ungedeckt zur Lagerung von Gülle nach Vergärung sowie die Lufttemperatur der Umgebungsluft (rote Linie; gemessen am Standort des Betriebs mit S31 Sensor), im Frühjahr 2024 vor und nach Befestigung des Sensors wie beschrieben in Kap. 3.1.1.1.

Tabelle 15: Kontinuierlich gemessene Gülletemperatur von Betrieb 6 mit Silo ungedeckt zur Lagerung von Gülle nach Vergärung sowie Umgebungstemperatur (gemessen am Standort des Betriebs mit S31 Sensor), im Frühjahr 2024, vor und nach Befestigung des Sensors wie beschrieben in Kap. 3.1.1.1.

Vor Befestigung	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gülletemperatur in °C	21.6	6.7	34.8
Umgebungstemperatur in °C	11.2	-0.8	27.7
Differenz Gülletemperatur – Umgebungstemperatur in °C	10.1	-6.2	22.0
Nach Befestigung			
Gülletemperatur in °C	32.0	26.1	34.9
Umgebungstemperatur in °C	14.6	8.2	26.4
Differenz Gülletemperatur – Umgebungstemperatur in °C	17.4	4.4	24.9

Anhang 6

Regelmässig auftretende Messausfälle von Betrieb 12 (Beispiele)



Abbildung 17: Messdaten von Betrieb 12 zur Illustration von Messausfällen.

Anhang 7

Übersicht Messdaten kontinuierliche Messungen

Tabelle 16: Gemittelte Gülletemperatur pro Monat der Sensoren unten (S u), Mitte (S m) oben (S o) in ˚C und Füllstand (Fst) der kontinuierlichen Messungen von Betrieb 11 und 12. Der Buchstabe 'v' nach S u, S m, S o und Fst gibt die Verfügbarkeit von Messdaten, d.h. den Anteil von 10-Minuten Messintervallen mit Messdaten am Total an 10-Minutenintervallen eines Monats. Die Verfügbarkeit von Messdaten ist ein Indikator für Ausfälle der Messgeräte unter Vorbehalt der Tabellenfussnoten.

B	Jahr	M	S u	S u v	S m	S m v#	S o	S o v#	Fst	Fst v
			˚C	Prozent	˚C	Prozent	˚C	Prozent	cm	Prozent
11	2024	11	10.3	65%*	2.5	4%	0.0	0%	149	63%*
11	2024	12	8.2	19%	4.5	10%	0.0	0%	142	100%
11	2025	1	6.3	16%	3.2	93%	0.0	0%	208	81%
11	2025	2	7.0	66%	5.9	100%	4.9	19%	185	100%
11	2025	3	7.4	100%	6.0	20%	0.0	0%	105	100%
11	2025	4	9.4	100%	9.9	45%	0.0	0%	151	93%
11	2025	5	11.6	80%	11.4	24%	0.0	0%	103	100%
11	2025	6	15.9	81%	19.5	58%	0.0	0%	154	57%
11	2025	7	17.8	100%	18.3	100%	0.0	0%	190	61%
11	2025	8	18.2	97%	19.3	64%	0.0	0%	150	63%
11	2025	9	17.4	100%	15.9	59%	0.0	0%	171	64%
11	2025	10	14.8	100%	9.6	99%	0.0	0%	187	57%
11	2025	11	10.5	99%	9.3	40%	0.0	0%	148	68%
11	2025	12	9.0	100%	0.0	0%	0.0	0%	169	71%
11	2026	1	6.1	98%	6.0	95%	4.4	22%	204	53%
11	2026	2	6.2	19%**	6.3	19%	0.0	0%	217	13%**
12	2024	11	12.1	55%***	0.0	0%	0.0	0%	186	53%***
12	2024	12	8.8	74%#	0.0	0%	0.0	0%	114	99%
12	2025	1	6.9	99%	3.6	64%	0.0	0%	180	94%
12	2025	2	7.3	99%	6.4	99%	0.0	0%	213	99%
12	2025	3	7.9	74%#	8.2	46%	0.0	0%	158	95%
12	2025	4	10.6	89%	10.5	47%	0.0	0%	161	83%
12	2025	5	15.8	68%#	0.0	0%	0.0	0%	73	79%
12	2025	6	19.2	68%#	0.0	0%	0.0	0%	84	75%
12	2025	7	22.1	86%	22.3	2%	0.0	0%	110	86%
12	2025	8	23.2	68%	25.8	47%	0.0	0%	113	91%
12	2025	9	20.7	99%	0.0	0%	0.0	0%	125	100%
12	2025	10	17.2	69%#	14.6	9%	0.0	0%	90	69%
12	2025	11	10.7	98%#	5.9	22%	0.0	0%	116	98%
12	2025	12	8.0	19%#	7.8	14%	0.0	0%	71	53%
12	2026	1	3.4	100%	2.2	11%	0.0	0%	121	90%
12	2026	2	4.9	18%**	2.5	19%	0.0	0%	168	19%**

* 19.5 Messtage

** 5.5 Messtage

*** 16.5 Messtage

#Sensor ist nicht die ganze Zeit in der Gülle. Eine Zahl <100% hat demnach nur begrenzte Aussagekraft hinsichtlich Ausfälle der Messgeräte

Anhang 8

Kontinuierlich gemessene Gülletemperaturen Sensor unten und Mitte von Betrieb 11 und 12 sowie

Tabelle 17: Temperaturen der kontinuierlich gemessenen Gülletemperaturen (Gülle, ˚C) Sensor unten und Mitte von Betrieb 11 und 12 nach Jahr und Monat, bei denen beide Sensoren unten und Mitte Gülletemperaturen erfassten; Verfügbar: Anteil der 10-Minutenmessintervalle mit Messdaten von Sensor unten und oben im Verhältnis zum Monatstotal (d.h. Anzahl Tage x 24 x 6); Δ absolut: Differenz der Gülletemperatur zwischen den Sensoren unten und Mitte in ˚C; Δ relativ: Differenz der Gülletemperatur zwischen den Sensoren unten und Mitte in Prozent der Temperatur Sensor unten. Zeilen mit kursiv gedruckten Zahlen: Messdauer <<30 Tage.

Betrieb	Jahr	Monat	Gülle unten in ˚C	Gülle Mitte in ˚C	Verfügbar	Δ absolut	Δ relativ	Füllstand in cm
11	*2024*	*11*	*8.8*	*2.5*	*4%*	*-6.30*	*72%*	*184*
11	2024	12	8.7	4.5	10%	-4.20	48%	193
11	2025	1	6.3	3.3	16%	-3.00	48%	219
11	2025	2	7	6.1	66%	-0.90	13%	177
11	2025	3	7.2	6	20%	-1.20	17%	160
11	2025	4	10.1	9.9	45%	-0.20	2%	188
11	2025	5	11	11.4	24%	0.40	4%	201
11	2025	6	16.3	19.5	58%	3.20	20%	170
11	2025	7	17.8	18.3	100%	0.50	3%	190
11	2025	8	18.2	19.3	64%	1.10	6%	177
11	2025	9	17.3	15.9	59%	-1.40	8%	193
11	2025	10	14.8	9.6	99%	-5.20	35%	187
11	2025	11	13.2	9.3	40%	-3.90	30%	215
11	2026	1	6	6	95%	0.00	0%	203
11	*2026*	*2*	*6.2*	*6.3*	*19%*	*0.10*	*2%*	*217*
12	2025	1	7	3.6	64%	-3.40	49%	193
12	2025	2	7.3	6.4	99%	-0.90	12%	213
12	2025	3	7.9	8.2	46%	0.30	4%	159
12	2025	4	10.1	10.5	47%	0.40	4%	187
12	2025	7	21.4	22.3	2%	0.90	4%	150
12	2025	8	23.4	25.8	47%	2.40	10%	161
12	2025	10	16.6	14.6	9%	-2.00	12%	150
12	2025	11	9	5.9	22%	-3.10	34%	173
12	2025	12	9.5	7.8	14%	-1.70	18%	193
12	2026	1	4.4	2.2	11%	-2.20	50%	166
12	*2026*	*2*	*4.9*	*2.5*	*18%*	*-2.40*	*49%*	*167*

Anhang 9

Kontinuierlich gemessene Gülletemperaturen und Vergleich mit der Umgebungstemperatur auf Betrieb 11 und 12

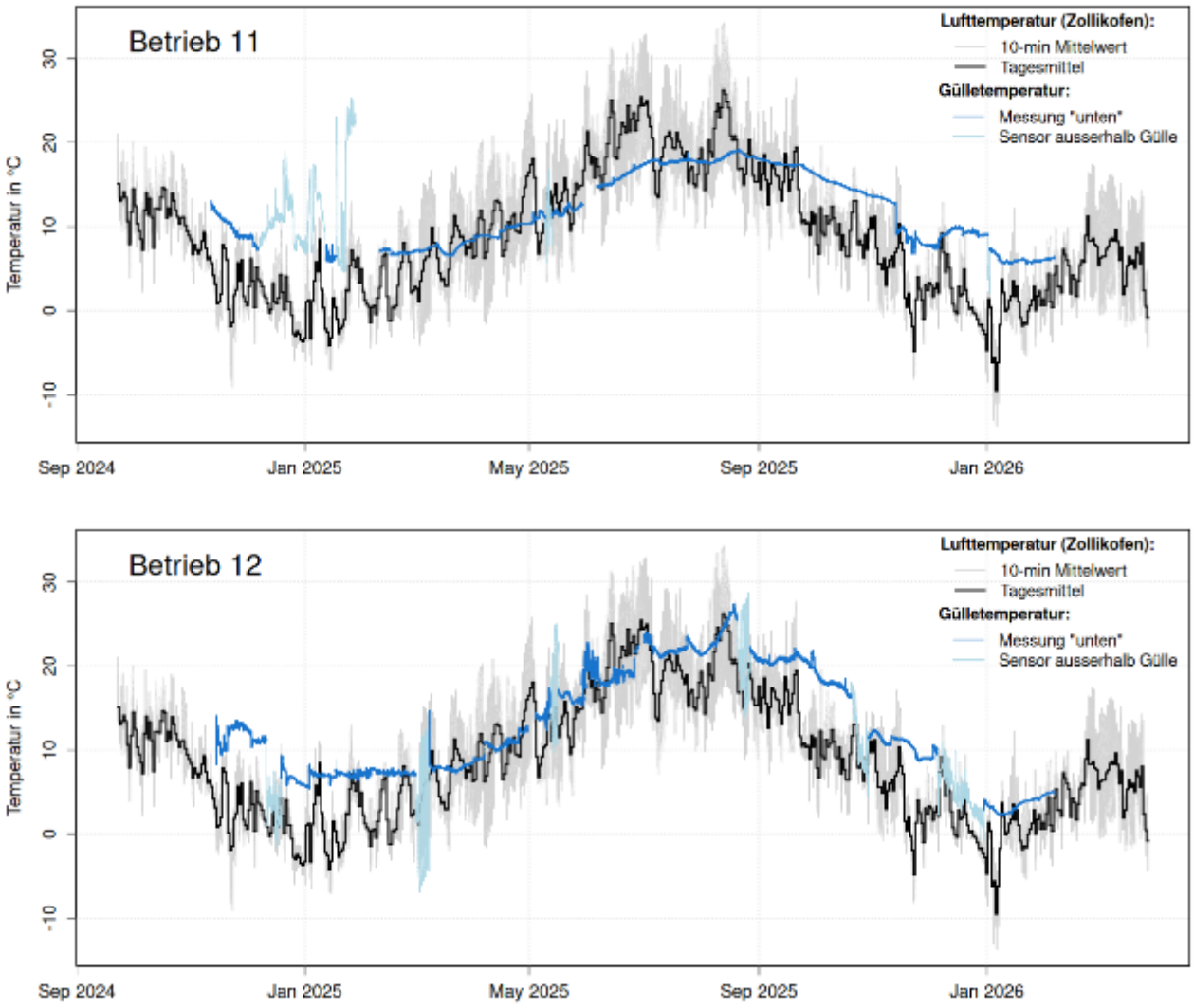


Abbildung 18: Verlauf der kontinuierlich gemessenen Gülletemperatur von Betrieb 11 und 12 zwischen 11.11.2024 bzw. 14.11.2024 und 06.02.2026 gemessen mit dem Sensor unten sowie die Lufttemperaturen der der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen, angegeben als 10 Minuten Mittelwert und Tagesmittel. Die hellblaue Linie zeigt Messdaten des Sensors unten ausserhalb der Gülle (nicht verwendet für die Bestimmung der Gülletemperatur). Betrieb 11 hat ein Unterflurlager unter einem Laufhof mit perforierter Abdeckung und Betrieb 12 einen Silo aus Beton mit Zeltabdeckung.

Anhang 10

Kontinuierlich gemessene sowie modellierte Gülletemperaturen und Vergleich mit der Umgebungstemperatur auf Betrieb 11 und 12

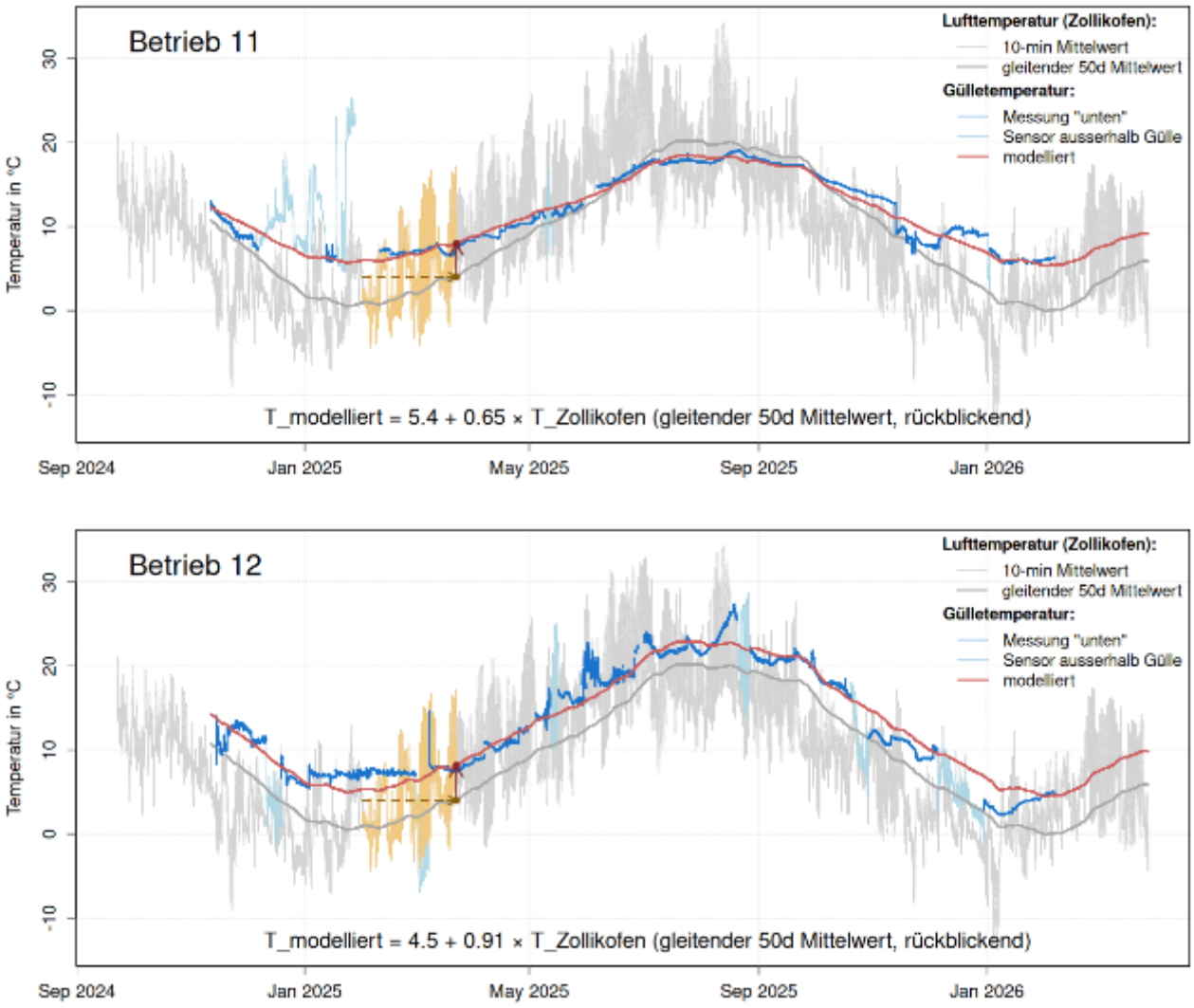
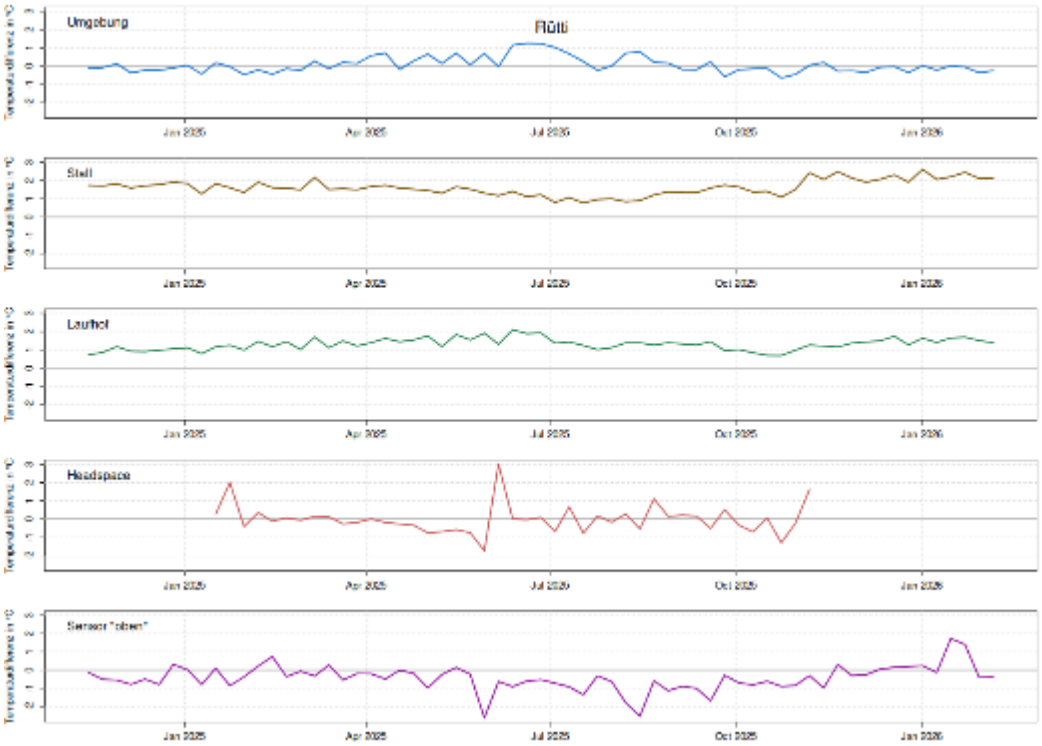


Abbildung 19: Verlauf der kontinuierlich gemessenen (10 Minuten Mittelwert) und modellierten Gülletemperatur von Betrieb 11 und 12 zwischen 11.11.2024 bzw. 14.11.2024 und 06.02.2026 sowie die Lufttemperaturen der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen angegeben als 10 Minuten Mittelwert sowie gleitender 50 Tage Mittelwert.

Anhang 11

Kontinuierlich gemessene Lufttemperaturen auf Betrieb 11 und 12

Betrieb 11



Betrieb 12

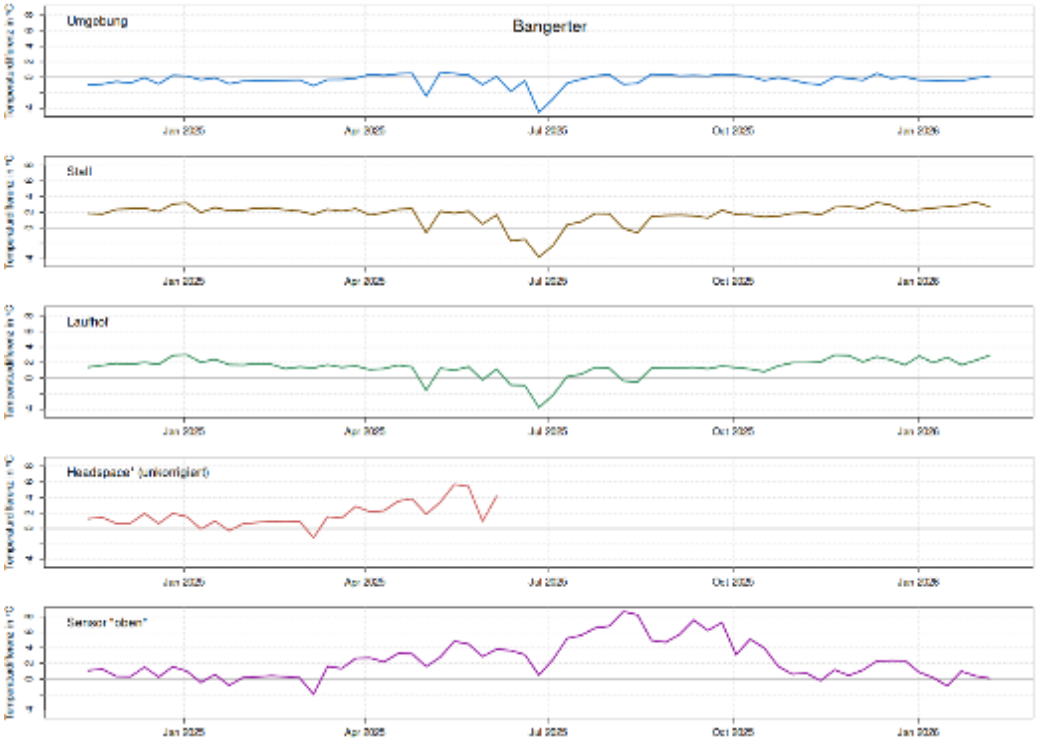


Abbildung 20: Abweichung der Lufttemperaturen der Umgebungsluft, von Stall, Laufhof, Headspace Güllelager, Sensor Gülletemperatur oben (nur Zeitfenster mit Position oberhalb der Gülle) zur Umgebungstemperatur der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen. Bei Betrieb 12 ist die Temperatur des Headspace mit unkorrigiert bezeichnet, da der dort eingesetzte Sensor in keinem Quervergleich eingesetzt werden konnte.

Anhang 12

Periodisch gemessene Gülletemperaturen und Füllstandswerte von 17 Lagerbehältern

Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung

Betrieb	2	5	8	10	11	Temperatur Luft in ˚C
Lager	2	1	1	1	1	
Gülletyp	Rindvieh*	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh	
Anzahl Messungen	14	9	11	8	24	
	Temperatur Gülle in ˚C					
Winter	6.5	9.1	7.9	9.7	6.5	1.4
Frühjahr	10.9	8.1	9.9	-	9.2	10.0
Sommer	17.7	18.7	18.9	18.1	18.1	19.9
Herbst	13.1	14.0	15.1	14.9	14.5	9.4
Jahresmittelwert	12.0	12.5	12.9	-**	12.1	10.2

*Gemisch aus Schweine- und Rindviehgülle

**Mittelwert weggelassen, da Temperatur Frühjahr fehlt

Unterflurlager mit fester Abdeckung

Betrieb	2	3	6	7	11	Temperatur Luft in ˚C
Lager	1	1	2	1	2	
Gülletyp	Rindvieh*	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh	
Anzahl Messungen	14	14	12	14	13	
	Temperatur Gülle in ˚C					
Winter	6.9	6.5	6.3	9.3	7.0	1.4
Frühjahr	10.8	9.9	10.8	10.8	8.8	10.0
Sommer	16.4	18.7	17.0	19.0	18.0	19.9
Herbst	12.7	14.0	13.1	17.7	17.2	9.4
Jahresmittelwert	11.7	12.3	11.8	14.2	12.7	10.2

Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung

Betrieb	9	12	4	Temperatur Luft in ˚C
Lager	1	1	2	
Gülletyp	Rindvieh	Rindvieh	Schwein	
Anzahl Messungen	8	21	7	
	Temperatur Gülle in ˚C			
Winter	11.9	7.1	12.4	1.4
Frühjahr	-	11.9	-	10.0
Sommer	21.9	19.8	24.3	19.9
Herbst	17.0	14.7	17.1	9.4
Jahresmittelwert	-*	13.4	-*	10.2

*Mittelwert weggelassen, da Temperatur Frühjahr fehlt

Silo ungedeckt/mit Zeltabdeckung

Betrieb	2	9	4	12	Temperatur Luft in ˚C
Lager	3	2	1	1	
Abdeckung	ungedeckt			Zeltdach	
Gülletyp	Rindvieh	Rindvieh	Schwein	Rindvieh	
Anzahl Messungen	14	8	11	21	
	Temperatur Gülle in ˚C				
Winter	8.0	9.6	7.3	7.7	1.4
Frühjahr	12.2	-	16.9	12.6	10.0
Sommer	19.6	21.4	21.6	22.6	19.9
Herbst	13.5	16.3	13.9	18.5	9.4
Jahresmittelwert	13.3	-*	14.9	15.4	10.2

*Mittelwert weggelassen, da Temperatur Frühjahr fehlt

Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung

Betrieb	2	5	8	10	11
Lager	2	1	1	1	1
Gülletyp	Rindvieh*	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh
Anzahl Messungen	14	8	12	8	19
	Füllstand Gülle in m				
Winter	1.8	2.2	2.2	2.7	1.7
Frühjahr	1.2	-	1.1	-	1.3
Sommer	2.2	1.4	1.7	1.4	1.6
Herbst	1.3	0.9	1.1	2.4	1.7
Jahresmittelwert	1.5	-**	1.5	-**	1.5

*Gemisch aus Schweine- und Rindviehgülle
**Mittelwert weggelassen, da Temperatur einer Jahreszeit fehlt

Unterflurlager mit fester Abdeckung

Betrieb	2	3	6	7	11
Lager	1	1	2	1	2
Gülletyp	Rindvieh*	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh	Rindvieh
Anzahl Messungen	15	11	13	14	12
	Füllstand Gülle in m				
Winter	1.9	0.8	0.5	3.0	-
Frühjahr	1.2	1.4	0.5	2.4	1.9
Sommer	1.2	1.3	0.8	2.7	1.3
Herbst	1.1	1.1	0.8	3.4	1.6
Jahresmittelwert	1.3	1.2	0.7	2.8	-*

*Mittelwert weggelassen, da Temperatur einer Jahreszeit fehlt

Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung

Betrieb	9	12	4
Lager	1	1	2
Gülletyp	Rindvieh	Rindvieh	Schwein
Anzahl Messungen	8	13	7
	Füllstand Gülle in m		
Winter	2.0		0.9
Frühjahr	-	2.3	-
Sommer	2.2	0.3	0.9
Herbst	2.1	1.4	1.3
Jahresmittelwert	-*	-*	-*

*Mittelwert weggelassen, da Temperatur einer Jahreszeit fehlt

Silo ungedeckt/mit Zeltabdeckung

Betrieb	2	9	4	12
Lager	3	2	1	1
Abdeckung	ungedeckt			Zelt-dach
Gülletyp	Rindvieh	Rindvieh	Schwein	Rindvieh
Anzahl Messungen	14	8	14	17
	Füllstand Gülle in m			
Winter	1.5	2.8	2.8	1.8
Frühjahr	0.5	-	0.4	1.2
Sommer	0.8	2.6	1.9	1.3
Herbst	1.4	4.2	0.9	1.1
Jahresmittelwert	0.9	-*	1.1	1.4

*Mittelwert weggelassen, da Temperatur einer Jahreszeit fehlt

Anhang 13

Merkmale von Ställen für Rindvieh mit perforierten bzw. planbefestigten Laufflächen

Rindviehställe mit perforierten Laufflächen haben die folgenden Güllelagertypen:

- Unterflurlager unter Laufhof mit perforierter Abdeckung; bei 3 Betrieben ist dies das einzige Lager (Betriebe 5, 8, 10); der Betrieb 11 hat zusätzlich ein nachgeschaltetes Unterflurlager mit fester Abdeckung.
- Alle 4 Betriebe halten ausschliesslich Milchkühe in einem Boxenlaufstall mit Produktion von Vollgülle.
- Der Betrieb 5 hat nur im an den Stall angrenzenden Laufhof perforierte Laufflächen; die Betriebe 8 und 11 haben bei den Laufgängen zwischen den Boxen feste Laufflächen und einen perforierten Boden zwischen Fressachse und erster Liegeboxenreihe (kombinierter Laufhof/Fressgang bei Betrieb 11). Betrieb 10 hat ausschliesslich perforierte Flächen.

Rindviehställe mit planbefestigten Laufflächen haben 1 oder 2 Güllelager der Typen:

- Unterflurlager mit fester Abdeckung (Betriebe 2, 3, 6, 7)
- Vorgrube Unterflur mit fester Abdeckung (Betriebe 9, 12)
- Silo ungedeckt (Betriebe 2, 9)
- Silo mit Zeltdachabdeckung (Betrieb 12; dieser Güllelagertyp ist nicht in die Auswertung eingeschlossen, da wegen der Abdeckung tendenziell höhere Temperaturen vorliegen)
- 1 Betrieb hat 1. Vorgrube mit fester Abdeckung und 2. ungedeckter Güllesilo (Betrieb 9)
- 1 Betrieb hat 1. Güllelager mit fester Abdeckung und 2. ungedeckter Güllesilo (Betrieb 2)
- 1 Betrieb hat 1. Vorgrube mit fester Abdeckung und 2. Güllesilo mit Zeltdach (Betrieb 12; Temperatur Silo in Auswertung nicht eingeschlossen)
- Alle 3 Betriebe mit zwei Lagern haben Milchkühe, Boxenlaufstall
- 4 Betriebe haben Milchkühe in einem Boxenlaufstall (Betriebe 2, 7, 9, 12; Betrieb 2 hat einen urspünglichen Anbindestall in einen Boxenlaufstall umgebaut)
- Je 1 Betrieb hat Mastrinder Vormast (Betrieb 6) und Mutterkühe mit eingestreuter nicht strukturierter Liegefläche (Gülle+Mist; Betrieb 3)

Anhang 14

Schätzung der Methanemissionen der Güllelager 1 von Betrieb 11 und 12 basierend auf der Lufttemperatur und der Gülletemperatur

Tabelle 18: Daten als Grundlage zur Schätzung der Methanemissionen (Füllstand der Güllelager 1 von Betrieb 11 und 12 in cm; Niederschlagssumme in mm, Menge an abbaubarer organischer Substanz (kg VS; VS: engl. Volatile Solids), Lufttemperatur, Gülletemperatur in °C, Methanemission geschätzt basierend auf Lufttemperatur, Gülletemperatur und die Differenz zwischen den beiden Ansätzen (=T Gülle / T Luft).

Betrieb	Monat	Füllstand	Niederschlag*	Org. Subst.	T Luft*	T Gülle**	CH_4 T Luft	CH_4 T Gülle	Differenz
		cm	mm	kg VS	°C	°C	m^3	m^3	
11	1	208	120	11779	-1.6	5.2	151	298	1.98
11	2	185	31	11483	3.6	6.7	249	339	1.36
11	3	105	22	6575	6.5	7.4	190	207	1.09
11	4	151	48	9200	10.4	9.4	387	352	0.91
11	5	103	101	5966	13.0	11.8	320	285	0.89
11	6	154	53	9366	21.0	15.8	1039	653	0.63
11	7	190	131	10682	19.0	17.9	992	901	0.91
11	8	150	159	8151	19.8	18.4	813	717	0.88
11	9	171	152	9368	14.6	17.2	583	737	1.26
11	10	187	116	10634	9.4	13.4	406	593	1.46
11	11	148	114	8435	4.2	9.9	194	337	1.73
11	12	169	14	10704	2.0	8.9	198	389	1.97
12	1	180	120	9293	-1.6	6.3	119	263	2.22
12	2	213	31	12040	3.6	7.1	261	368	1.41
12	3	158	22	9004	6.5	8.3	260	311	1.20
12	4	161	48	8981	10.4	10.6	377	387	1.02
12	5	73	101	3859	13.0	15.7	207	265	1.28
12	6	84	53	4670	21.0	19.5	518	454	0.88
12	7	110	131	5620	19.0	22.1	522	687	1.32
12	8	113	159	5624	19.8	23.5	561	777	1.39
12	9	125	152	6261	14.6	20.6	390	673	1.73
12	10	90	116	4672	9.4	16.2	179	337	1.89
12	11	116	114	6059	4.2	10.5	139	258	1.85
12	12	71	14	4100	2.0	6.9	76	123	1.63
11	Total	-	1061	112343	-	-	5522	5808	1.05
12	Total	-		80184	-	-	3609	4904	1.36

* gemäss Daten der Station von MeteoSchweiz, Zollikofen
https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/messwerte.html#param=messwerte-niederschlag-10min&table=false&station=BER&chart=month (20.04.2026)

** gemäss Tabelle 4