

SkitGass

Klimagassutslipp fra bløtgjødsel

NORSØK RAPPORT | VOL. 9 | NR. 20 | 2024



Sissel Hansen, Martha Ebbesvik, Ingvar Kvande, Tatiana F. Rittl (NORSØK);
Marko Jakovljevic, John Morken, Fredrik Nerol Beilegaard, Peter Dörsch (NMBU)

TITTEL

SkitGass, Klimagassutslipp fra bløtgjødsel

FORFATTERE(E)

Sissel Hansen, Martha Ebbesvik, Ingvar Kvande, Tatiana F. Rittl (NORSØK); Marko Jakovljevic, John Morken, Fredrik Nerol Beilegaard, Peter Dörsch (NMBU)

DATO: 20.01.25	RAPPORT NR. Vol 9 nr 20 2024	Åpen/Lukket (til)	PROSJEKT NR.: 2022/66637, Agros 203854
ISBN: 978-82-17-215-6	ISSN:	ANTALL SIDER: 82	ANTALL VEDLEGG: 1

OPPDRAGSGIVER:

Landbruksdirektoratet med flere

KONTAKTPERSON NORSØK:

Sissel Hansen

STIKKORD:

Gjødsellager; Husdyrgjødsel; Kalk; Lystgass;
Metan; Organisk materiale, Storfe; Temperatur,
VS

Lime; Manure storage; Manure; Methane;
Nitrous oxide; Temperature; volatile solids; VS

FAGOMRÅDE:

Landbruk, Miljø

Agriculture, Environment

SAMMENDRAG:

Hovedmålet for prosjektet SkitGass med hjelpeprosjekt var å identifisere muligheter til å redusere utslipp av klimagasser fra husdyrgjødsellager. Vi undersøkte gjødseltemperatur i 16 gjødsellagre og klimagassutslipp i 8 av dem (to kjellere, to åpne kummer med ny gjødsel ovenfra, to kummer med tak og ny gjødsel nedenfra og to lagre med biorest). Vi fant at det var kjølig i gjødsellagrene med en gjennomsnittstemperatur på 8,4 °C i årene 2022 og 2023. Selv om sommeren var temperaturen sjelden over 15°C. Gjødsel var varmest i august med en gjennomsnittstemperatur på 13,8°C i 2022. Det var stor variasjon mellom gjødsellagrene i vanninnhold og skorpedannelse. Gjennomsnittlig innhold av organisk materiale (VS) i gjødsel varierte fra 2,5 til 6,6 % VS. Det var lavest VS % i biorest fra biogassreaktor, og i en kum uten tak. Metan (CH₄) var den gassen som betydde desidert mest for utslipp av klimagasser fra lager for bløtgjødsel. Det var store variasjoner i utslipp av metan både mellom gjødsellager og gjennom året. Medianverdi for alle målinger var 4,1 mg CH₄-C per kg VS i løpet av en time. Det var lavest utslipp av metan (1,1-1,2 mg CH₄-C per kg VS og time i medianverdi) der det var høy konsentrasjon av VS i selve bløtgjødsel (gjødsel uten skorpe eller under skorpa). Kalk kan muligens spille en rolle her. Vi fant også lavere utslipp av metan ved tjukk, porøs skorpe. Per kg VS var det ikke lavere utslipp fra biorest enn fra ubehandlet gjødsel. Tilsetning av fersk gjødsel eller annet energirikt materiale som urea/olje-produkt gir stor øking i metanutslipp fra lager

for biorest. Det er spesielt viktig å ha effektive tiltak for å kjøle ned biorest før lagring. Bedre grunnlagsdata for modeller for vurdering av ulike tiltak er nødvendig.

Tiltak for reduserte utslipp fra gjødsellager: Lav temperatur i gjødsellageret; Tak over gjødsellager og tilførsel av ny gjødsel nedenfra; surgjøring; tett lager og oppsamling av gass fra gjødsel eller biorest; god utråtning av biorest og nedkjøling før lagring. Tiltak som trenger mer forskning: Høyt innhold av VS i kombinasjon med tilførsel av lett tilgjengelig kalk; separering av bløtgjødsel og biorest; tilførsel av finfordelt luft nedenfra.

SUMMARY:

The main goal of the SkitGass project was to identify opportunities to reduce greenhouse gas emissions from livestock manure storage. We investigated manure temperature in 16 manure storages and greenhouse gas emissions in 8 of them. We found that it was cool in the manure storages with an annual average temperature of 8.4 °C. Even in summer, the temperature was rarely above 15 °C. The manure was warmest in August and had an average temperature of 13.8 °C in 2022. We found that there was a large variation between manure storages in water content and crust formation. The average content of organic matter (volatile solids, VS) in the manure varied from 2.5 to 6.6% VS. It was lowest VS in digestate from a biogas reactor, and in an outdoor slurry container without roof. Methane (CH₄) was the gas that was by far the most important for greenhouse gas emissions from liquid manure storage. There were large variations in methane emissions both between manure storages and throughout the year. The median value for all measurements was 4.1 mg CH₄-C per kg VS and hour. The lowest median methane emissions (1.1-1.2 mg CH₄-C per kg VS and hour) were found where there was a high VS% in the slurry itself (without crust or below the crust). Application of lime may play a role here. We also found lower methane emissions with thick, porous crust.

Per kg VS, the emissions from digested slurry were not lower than from storage with untreated manure. Adding fresh manure or other energy-rich material such as urea/oil product gives a large increase in methane emissions from storage for digestate. It is important to have effective measures to cool down digestate before storage. Better baseline data for models for assessing different measures are needed.

Suggested measures for reduced emissions from manure storage: Low temperature in the manure storage; Roof over manure storage and new manure from below; Acidification; Tight storage and collection of gas from manure or digestate; Good degradation of digestate and cooling before storage. Measures that need more research: High content of VS in combination with the supply of easily accessible lime; Separation of liquid manure and digestate; supply of finely distributed air from below.

LAND:	Norge
FYLKE: MØRE OG ROMSDAL	Møre og Romsdal
KOMMUNE:	Tingvoll

GODKJENT

Turid Strøm

NAVN

PROSEKTLERER

Sissel Hansen

NAVN

Forord

Denne rapporten bygger på kunnskap fra prosjektene «Reduserte utslipp av klimagasser fra husdyrgjødsellager, SkitGass» 2021-2024 (2020/72611, Agros 138337) og «Metanutslipp fra bløtgjødsel, Metansensor 1» 2023-2024 (2022/66637-3, Agros 203854) finansiert av Landbruksdirektoratet; «TempBløt, Temperatur, nøkkelen til lave utslipp av drivhusgasser fra bløtgjødsel «(2021/2521, Agros 154529) fra Statsforvalteren i Møre og Romsdal og «Reduserte utslepp av klimagassar frå gjødsellager - tiltak bonden kan gjennomføre» 2020/13071 - 116827/2020 fra Møre og Romsdal fylkeskommune. Vi takker for støtten som har gjort det mulig for oss å komme så langt som vi har kommet til nå i dette arbeidet.

Hovedmål for SkitGass var: «Identifisere muligheter til å redusere utslipp av klimagasser fra husdyrgjødsellager», for Metansensor 1: «Mer kunnskap om når det slippes ut metan fra ulike typer gjødsellager for storfe», for TempBløt: «Å samle inn data om temperatur i ulike lagertyper for bløtgjødsel» og for Tiltak bonden kan gjøre: «Å informere om tiltak som kan redusere klimagassutslipp fra storfegjødsellager i Møre og Romsdal».

Prosjektene har vært gjennomført i sammenheng og i et samarbeid mellom Norsk senter for økologisk landbruk (NORSØK), Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) ved fakultetene for Miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA) og Realfag og teknologi, Institutt for bygg og miljøteknologi (REALTEK) og Norsk Landbruksrådgiving (NLR). Stor takk til seniorforsker Lena Rodhe fra Research Institute of Sweden (RISE) for mangeårig rådgivning både i SkitGass og tidligere prosjekt og til professor Søren O. Petersen og seniorforsker Anders Peter S. Adamsen, begge Aarhus Universitet for gode diskusjoner og gode råd, og alle for informasjon om svenske, danske og internasjonale resultater på dette området. Takk til NLR ved Bjørn Steinar Skarbø og Jon Geirmund Li for hjelp med å finne aktuelle gårder, gode kommentarer underveis og for felles Fjølsmøte, Statsforvalterens landbruksavdeling i Møre og Romsdal og Åsmund Asper for synspunkt til gjennomføring av prosjektet.

Vi takker forskningstekniker Peggy Haugnes og rådgiverne Maria Båtnes og Sara Hansdotter, stipendiat Kristian Nikolai Jæger Hansen og andre som har stilt opp for å få gjennomført målinger og registreringer i felt og analyser av gjødselprøver på labben og behandling av data. Takk til avdelingsingeniør Trygve Fredriksen på MINA, NMBU for analyse av gassprøver. Ikke minst takk til gårdbrukerne Jørn Ola Engdal, Johan Brandvik, Rannveig Eikrem, Arnstein Mjønesaune, Erik Lindhardt, Matthias Reitan og andre gårdbrukere som har vært med i prosjektet, for registreringer i gjødsellagrene deres, og for svar på våre mange spørsmål. Takk til Grete Lene Serikstad som har gått igjennom språket og gitt verdifulle korrigeringer.

Tingvoll, 20.01.25

Sissel Hansen

Innhold

1	Innledning.....	8
1.1	Bakgrunn for SkitGass	8
1.2	Gassdannelse og utslipp fra bløtgjødsellager	9
1.2.1	Metan (CH ₄)	9
1.2.2	Lystgass (N ₂ O)	10
1.3	Formål	10
2	Materiell og metode	11
2.1	Gjødsellager	11
2.2	Registreringer.....	14
2.2.1	Klimadata	14
2.2.2	Gjødsel	15
2.2.3	Klimagasser.....	17
2.3	Statistikk.....	21
3	Resultat	22
3.1	Temperatur	22
3.2	Gjødselenskaper.....	26
3.3	Klimagassutslipp.....	28
3.3.1	Lyststgass	30
3.3.2	Metan	33
4	Diskusjon eget arbeid.....	39
4.1	Metodiske utfordringer.....	39
4.2	Våre funn.....	41
4.2.1	Temperatur	41
4.2.2	Klimagasser	41
4.3	Åpne arbeidsmøte.....	46
4.3.1	Fjøsmøte	46
4.3.2	Møte og Webinar.....	46
5	Anbefalte tiltak i Danmark og Sverige for reduserte klimagassutslipp fra gjødsellagre.	48
5.1	Danmark.....	48
	Biogassanlegg	48
	Forsuring med svovelsyre.....	48
	Oppsamling og fakling av gass.....	49
5.2	Sverige.....	49

6	Tiltak og anbefalinger for reduserte klimagassutslipp fra lager for bløtgjødsel fra storfe	51
6.1	Generelle anbefalinger	51
6.2	Mulige tiltak som trenger utprøving før de anbefales.....	52
7	Andre forskningsbehov	54
8	Konklusjon.....	56
9	Referanser	57
10	Vedlegg.....	60
	Diagram over registrerte parametere på gårder hvor det ble undersøkt gassutslipp.....	60
10.1	Gårder med kjeller, to gårder	60
10.2	Gårder med åpen kum, to gårder	65
10.3	Gårder med kum med tak, ny gjødsel under skorpa, to gårder.....	70
10.4	Gårder med kum med biorest, ny gjødsel ovenfra, to gårder	75



Bilde 1. Ved tilførsel av ny gjødsel nedefra dannes det skorpe også på gjødsel lagret i åpen kum. Ved temperaturregistreringer har vi kalt denne type kum for KÅbunn. Vi undersøkte ikke gassutslipp her. Foto: NORSØK

Forkortelser/begrep

Arker: encellede mikroorganismer uten cellekjerne som ligner på, men ikke er, bakterier. De blir fortsatt ofte omtalt som arke-bakterier fordi de tidligere ble oppfattet som bakterier.

CH₄: metan

CH₄-C: karbon som er bundet i metan

CO₂: karbondioksid

Eutrofiering: er en prosess i innsjøer eller i havet der planteproduksjonen øker på grunn av økt tilførsel av næringsstoffer

Flytedekke: er et flytende dekke på toppen av et bløtgjødsellager. Det kan være ei naturlig skorpe eller et dekke som er plassert på toppen av gjødsle

Inokulum: (fra [latin](#): Inoculum). mikroorganismer som tilsettes som en startkultur for en biologisk prosess / omdanning, for eksempel melkesyrebakterier, metanogene og metanotrofe bakterier.

IPCC: International Panel on Climate Change = FNs klimapanel

N₂O: lystgass

NH₃: ammoniakk

NH₄-N: ammonium-nitrogen

NO₃-N: nitrat-nitrogen

Metanogene: Arker som danner metan fra hydrogen eller organiske fettsyrer gjennom henholdsvis hydrogenotrof og acetotrof metanogenese

Metanotrofe: Bakterier som bruker CH₄ som energi og karbonkilde og oksiderer CH₄ til CO₂ eller HCO₃⁻ (bikarbonat).

NLR: Norsk landbruksrådgiving

NO_x: nitrogenoksidforbindelser

VS: Volatile solids, som er det samme som organisk materiale i gjødsle. Det bestemmes ved glødetap.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for SkitGass

Det er et hardt press på landbruket for å redusere utslipp av klimagasser. I 2019 inngikk jordbruket og regjeringen en intensjonsavtale om reduserte klimagassutslipp og økt opptak av karbon for perioden 2021-2030 (Regjeringen, 2019). Målet er å redusere klimagassutslipp relatert til jordbruket med 5 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i løpet av 10-årsperioden fra 2021 til 2031. Bedre gjødselhandtering er foreslått som et tiltak som vil bidra til økt måloppnåelse. I Norge anslås utslippet fra gjødsellager å utgjøre ca. 20 % av utslippet av metan fra melkeku (Bjørn Huso Landbruksdirektoratet pers. med. oktober 2024). I Klimakur 2030 har Miljødirektoratet (2020) anslått at klimagassutslippene fra husdyrgjødsel reduseres med 253 000 tonn CO₂-ekvivalenter dersom mengden av husdyrgjødsel som behandles i biogassanlegg økes fra 1 % i dag til 25 % i 2030. Ut fra kostnader, størrelse, energibehov og avstand til et mulig stort anlegg er ikke biogass en hensiktsmessig løsning for alle gårder. Det er derfor viktig å finne andre og rimeligere måter å redusere utslipp av klimagasser fra gjødsellager på. Samtidig er det viktig å dokumentere utslipp fra ulike lager for husdyrgjødsel og biorest. En stor utfordring for estimatene i Klimakur 2030 (Miljødirektoratet 2020) og i det nasjonale utslippsregnskapet (Miljødirektoratet m.fl., 2019) er få målinger under norske forhold av utslipp av N₂O og CH₄ fra gjødsellager. Målinger som er gjort i Sverige (Rodhe m.fl. 2012) viste at utslippsestimater basert på modellene fra IPCC (2006) var mye høyere enn det registreringene under svenske forhold viste. Som understreket i Klimakur 2030 er det manglende kunnskap om utslipp fra ulike løsninger for utforming av husdyrrom og lagring. De fleste data på klimagassutslipp fra gjødsellager kommer fra utenlandske undersøkelser eller fra lab- eller pilot-skala. Det er lite innsikt i variasjonen i egenskapene til gjødsel fra norske gårdsbruk. Den norske byggestilen med bløtgjødselkjeller under fjøs og åpen forbindelse til husdyrrom skiller seg blant annet fra praksis i de fleste land. I Norge er mesteparten av gjødsel fra storfe lagret som bløtgjødsel. I 2018 var 65 % av storfegjødsel lagret som bløtgjødsel i gjødselkjeller, 27 % som bløtgjødsel i utendørslager og 8 % var lagret på annen måte (Kolle & Oguz-Alper 2020). Fordi det, så langt vi kjenner til, ikke er gjort målinger av utslipp av klimagass fra gjødselkjeller og en stor andel av gjødsel er lagret i gjødselkjeller har vi valgt å ta med denne lagertypen i undersøkelsene av klimagassutslipp.

Betydningen av gjødselskorpas beskaffenhet på utslipp av CH₄ og N₂O fra gjødsellager og effekt av fôring, vanninnblanding og lagringstid er også lite studert under norske forhold.

SkitGass bygger på prosjektet "Utslipp av klimagasser fra gjødsellager - En vurdering av åpne lager for bløtgjødsel og biorest og lager med dekke (Gjødsellager-utslipp)" 2018-2020, finansiert av Landbruksdirektoratet (prosjekt nr 17/60843 – 2). Her har vi utviklet utstyr og metodikk for måling av gassutslipp fra gjødselkummer. Resultatene herfra er brukt som en bakgrunn for mer systematiske undersøkelser i SkitGass hvor vi også inkluderer gjødselkjellere.

1.2 Gassdannelse og utslipp fra bløtgjødsellager

Utslipp av gassene lystgass (N_2O), ammoniakk (NH_3) og metan (CH_4) er problematiske ut fra et miljøperspektiv. Lystgass og metan er klimagasser som bidrar til global oppvarming. Ammoniakkutslipp bidrar til atmosfærisk nedfall av reaktivt nitrogen og dermed til uønsket eutrofiering. Samtidig blir det lavere gjødseffekt av gjødsla ved stor ammoniakkfordamping. Rundt 1 % av fordampet NH_3 omdannes til N_2O (IPCC, 2006). Det er viktig å se utslipp av de ulike klimagassene fra husdyrgjødsellager i sammenheng. Ellers vil et tiltak som reduserer utslipp av en gass en plass kunne føre til økte utslipp av en annen gass, eller av den samme gassen en annen plass (Sajeev m.fl. 2018).

Utslipp av alle klimagasser øker med temperatur når forholdene ellers er like (Rodhe m.fl., 2012, Ebbesvik m.fl., 2021, Hilgert m.fl. 2022). Dekke på gjødsellager og egenskapene til dekket har mye å si for klimagassutslippene. I bløtgjødsellager fra storfe dannes det ei naturlig skorpe som består av fiber som flyter opp. Naturlig skorpe på et gjødsellager dannes etter ca 10-20 dager, samtidig reduseres NH_3 -fordamping (Misselbrook m.fl., 2005). Hastigheten på skorpedanning og tykkelsen på skorpa øker med økende tørrstoffinnhold i gjødsla, minkende overflate i forhold til gjødselvolum, økende andel fiber i fôrrasjonen og fordamping, og den minker med omrøring og annen bevegelse i gjødsla og nedbør (Smith m.fl., 2007). Med stigende porøsitet og tørrstoffinnhold øker utslippene av N_2O , men utslippene av CH_4 reduseres (Rodhe m.fl. 2012).

1.2.1 Metan (CH_4)

Metan dannes når organisk materiale brytes ned uten oksygen (anaerob omdanning). Jo mer lett tilgjengelige karbonforbindelser det er og jo varmere det er, jo mer CH_4 dannes (Rodhe m.fl., 2012). Det er to typer organismer som danner metan ved å bryte ned organisk materiale: i) Hydrogenotrofe metanogener, der CH_4 dannes fra hydrogen (H_2) og CO_2 , ii) Acetotrofe metanogener, der CH_4 dannes fra eddiksyre (CH_3COOH) (Dalby m.fl. 2021). I et bløtgjødsellager uten røring oppstår det raskt anaerobe forhold og dermed dannelse av metan. I et slikt lager er det rikelig tilgang på lett nedbrytbart organisk materiale og pH er ofte rundt 7-8, noe som er optimalt for mikrobiell aktivitet og metandanning.

Lite fiber i fôrrasjonen gir reduserte metanutslipp fra fordøyelsen til storfe, men gir økte utslipp fra gjødsellager (Hindrichsen m.fl. 2006). En årsak til dette er høyere innhold av lett nedbrytbare karbonforbindelser i gjødsla.

I ei porøs, naturlig skorpe eller annet porøst flytedekke antas det at aerobe, metanotrofe bakterier oksiderer en del av CH_4 fra bløtgjødsel til CO_2 (Sommer m.fl. 2000; Petersen m.fl. 2005). Dette fører til reduserte utslipp av CH_4 fra et bløtgjødsellager. Petersen m.fl. (2005) anbefaler derfor tak over utendørs lager for å unngå at nedbør i skorpa gjør skorpa våt og lite porøs. For at skorpa skal bli tørr og porøs må ny gjødsel tilføres under skorpa uten at skorpa brytes. Gjødsla må også inneholde mye fiber. Det er imidlertid ønskelig med flere målinger for å undersøke om reduserte CH_4 -utslipp på grunn

av skorpedannelse oppveies av økte N_2O - utslipp, og om CH_4 samlet under skorpa frigjøres når skorpa brytes.

1.2.2 Lystgass (N_2O)

Lystgass dannes når mineralnitrogen (NO_3-N , NH_4-N) er tilgjengelig, og det er vekslende aerobe og anaerobe forhold. FN sitt klimapanel (IPCC, 2006) anslår at 0,5 % (0,25 %-1 %) av alt nitrogenet som finnes i lagret bløtgjødsel omdannes til N_2O-N ved naturlig flytedekke/skorpe og at det ikke blir utslipp av N_2O i bløtgjødsel uten skorpe. Balansen mellom protein og energi i fôrrasjonen påvirker innholdet av N i gjødsla slik at et overskudd av protein fører til et høyere innhold av ammoniumnitrogen i gjødsla og dermed økt fare for utslipp av ammoniakk og lystgass (Sajeev m.fl. 2018). I Ebbesvik m.fl. (2021) er mekanismene som fører til dannelse og utslipp av lystgass i porøs skorpe forklart, og mer detaljert beskrevet i Petersen m.fl. (2013).

1.3 Formål

I denne rapporten presenterer vi målinger av utslipp av metan og lystgass fra lager av bløtgjødsel fra storfe. Til dette har vi brukt kammermetoden. Ved denne metoden plasseres lukkede kammer oppå gjødsla, og vi tar ut gassprøver med bestemte mellomrom for å bestemme forandring av konsentrasjon i kammeret over tid. Dette brukes til å bestemme hastigheten på gassutslipp eller opptak. Resultatene settes i sammenheng med type gjødsellager, temperatur, skorpedanning, innhold av tørrstoff og organisk stoff under ulike forhold. Vi diskuterer metodiske utfordringer og peker på veien videre for forbedrete estimater av metanutslipp. Vi har blant annet startet utprøving av en rimelig metansensor kompensert for temperatur og luftfuktighet. Foreløpige resultat presenteres her. Vi sammenligner våre resultater med funn i Sverige og Danmark og kommer med forslag til tiltak for å redusere utslipp av klimagasser fra bløtgjødsellager.



Bilde 2. Det er mange faktorer å holde rede på for å finne ut av gjødsellagerets hemmeligheter. Foto: NORSØK.

2 Materieell og metode

2.1 Gjødseellager

Alle gårdene i dette prosjektet har melkekyr og gjødsla lagres som bløtgjødsel. Gårdene ligger i Møre og Romsdal og Trøndelag. Vi registrerte temperatur i tre lager fra hver av gjødseellagertypene nevnt ovenfor og to sluttlager for biorest. Vi har registrert klimagassutslipp med kammermetoden i to gjødsekkjellere, to utvendige lager uten dekke og med tilførsel av ny gjødseel fra toppen, to lager med tak og tilførsel av ny gjødseel i bunnen og to lager i utendørskummer med biorest, - en med plany-dekke og en med tak.

Tabell 1. Oversikt over gjødseellagre hvor det ble registrert gassutslipp i prosjektet og litt om melkeytelse og føring.

Gjødsel-lager	1	2	3	4	5	6	7	8
Type	FÅ	FT	KÅtopp	KÅtopp	KTbunn	KTbunn	KD_topp biorest	KT_topp _biorest
Ned-gravd	Ja	Delvis	Delvis	Delvis	Delvis	Delvis	Delvis	Delvis
På-fylling	Over gjødseel, åpent til fjøs med rister, kontinuerlig tilførsel	Over gjødseel, fra luker i skantil, flere ganger daglig	Over gjødseel, ofte litt gjødseel, ukentlig mer, månedlig større mengder	Over gjødseel, ny gjødseel 3-4 uker, noen ganger sjeldnere	Under gjødseel-overflate, ny gjødseel hver 14 dag	Under gjødseel-overflate, ny gjødseel hver 14-21 dag	Over gjødseel, ny biorest 12-14 ganger i døgnet	Over gjødseel, ny biorest 12-16 ganger i døgnet + fersk gjødseel av og til
Dekke	Fjøs	Fjøs	Ingen	Ingen	PVC-tak	PVC-tak	Plany	PVC-tak
Over-flate	220,5 m ²	100 m ²	254,3 m ²	201,0 m ²	490,6 m ²	248,7 m ²	754,4 m ²	142,0 m ²
Dybde	1,9 m	1,95 m	4,0 m	3,6 m	4,2 m	4,2 m	4,20 m	4,0 m
Volum	419 m ³	195 m ³	1017 m ³	724 m ³	2061 m ³	1045 m ³	3168 m ³	568 m ³
Robot-melker	nei	nei	ja	ja	ja	ja	ja	Ja - fra 2023
Melk ¹	6842 kg	5526 kg	8000 kg	7800 kg	9500 kg	9020 kg	ikke data	8375 kg
Kraftfôr ²	29 kg	35 kg	24 kg	35 kg	31 kg	35 kg	ikke data	22 kg

¹ kg energikorrigert melk (EKM) per årsku, ² kg kraftfôr per 100 kg EKM i året i 2022.

Gjødsellagertyper:

- **FT:** Fjøs med kjeller og tett forbindelse, ny gjødsel fra toppen
- **FÅ:** Fjøs med kjeller og åpen forbindelse, ny gjødsel fra toppen
- **KÅtopp:** Utvendig lager uten dekke og med tilførsel av ny gjødsel fra toppen
- **KÅbunn:** Utvendig lager uten dekke med tilførsel av gjødsel i bunnen eller hvor det ikke tilføres ny gjødsel etter oppfylling av kummen
- **KTbunn:** Kum med tak og tilførsel i bunn
- **Biorest:** Sluttlager for biorest, KD_topp biorest: Kum med Plany-dekke tilførsel fra toppen; KT_topp_biorest: kum med tak og tilførsel fra toppen

Mer informasjon om gjødsellagene der det ble registrert klimagassutslipp:

Gjødsellager 1. Gassregistreringer ble gjort gjennom gjødselport ikke så langt unna der ny gjødsel kom ned. Eldre fjøs.

Gjødsellager 2. Gassregistreringer ble gjort gjennom gjødselport et stykke unna der ny gjødsel kom ned. Eldre fjøs. Det ble tilsatt flytende kalk for en del år siden.

Gjødsellager 3. Utendørskum som tappes noen ganger om året og gjødsel overføres til andre gjødsellager. I april/mai hvert år ble gjødselkummen tilsatt flytende kalk (ca. 32 kg per m³ gjødsel) slik at jordene blir kalket samtidig med at de blir gjødslet. Det var noe bobler i denne gjødsel i perioder, men betraktelig mindre enn i gjødsellager 6.

Gjødsellager 4. Gjødselkummen var ofte full. Gårdbruker tappet ut lettflytende gjødsel til andre lager. Det var høy tørrstoffprosent og tykk skorpe som var tørr i overflata i tørre perioder med sol og vind. Bruker vann fra egen brønn, borevann, i fjøset. Dette vannet har høyt kalkinnhold.

Gjødsellager 5. På denne gården ble det tykk og porøs skorpe på toppen av bløtgjødsel. Bruker vann fra egen brønn, borevann, i fjøset. Dette vannet har høyt innhold av kalk og jern.

Gjødsellager 6. I april/ mai hvert år ble gjødselkummen tilsatt flytende kalk (32 kg per m³ gjødsel) slik at jordene blir kalket samtidig med at de blir gjødslet. Det var mye bobler i denne gjødsel gjennom hele året. Brukte vann fra egen brønn, borevann fra 80 meters dyp, i fjøset i 2018.

Gjødsellager 7. Gjødsellager for biorest fra et biogassanlegg med en blanding av kugjødsel og grisejødsel som substrat. Her ble det en gang i løpet av måleperioden tilsatt et ureaprodukt som er et restprodukt fra produksjon av omega 3-fettsyrer i fiskeindustrien. Innholdet varierer noe, men inneholder rundt 20,5 % N og 62 % tørrstoff. Tørrstoffet inneholder 15-20 % olje, da i form av etyl-estere og litt monoglyserider. Resten av tørrstoffet er stort sett urea. Et nedkjølingssteg ble brukt for å kjøle ned gjødsel underveis fra biogassreaktor til lager for biorest.

Gjødsellager 8. Gjødsellager for biorest på Tingvoll gard. Det er en utendørs gjødselkum med tak. Biogassanlegget har vært under utvikling i store deler av måleperioden. Også her er det et nedkjølingssteg. I perioder der det bare var ubehandlet gjødsel i gjødsellageret fordi biogassreaktor ikke var i drift er lageret karakterisert som KTtopp.

Type gjødsellager der vi registrerte gassutslipp



Bilde 3. Gjødselkjellere. De to bildene til venstre er fra lagre med tett forbindelse mellom fjøs og kjeller (FT) og bildet til høyre åpen forbindelse (FÅ). Vi tok uansett gassprøver gjennom gjødselporten. Foto: NORSØK.



Bilde 4. Kummer med åpen forbindelse og tilførsel av ny gjødsel over gjødseloverflaten (KÅtopp). Foto: NORSØK.



Bilde 5. Kummer med tak og tilførsel av ny gjødsel i bunnen (KTbunn). Bildet i midten viser sterk skorpedannelse i gjødsellager 5 og bilde til høyre bobler i gjødsellager 6. Foto: NORSØK



Bilde 6. Lageret for biorest på Tingvoll gard er også en kum med tak (KTtopp_biorest). Bioresten er svært tynn og lettflytende. Foto: NORSØK

2.2 Registreringer

2.2.1 Klimadata

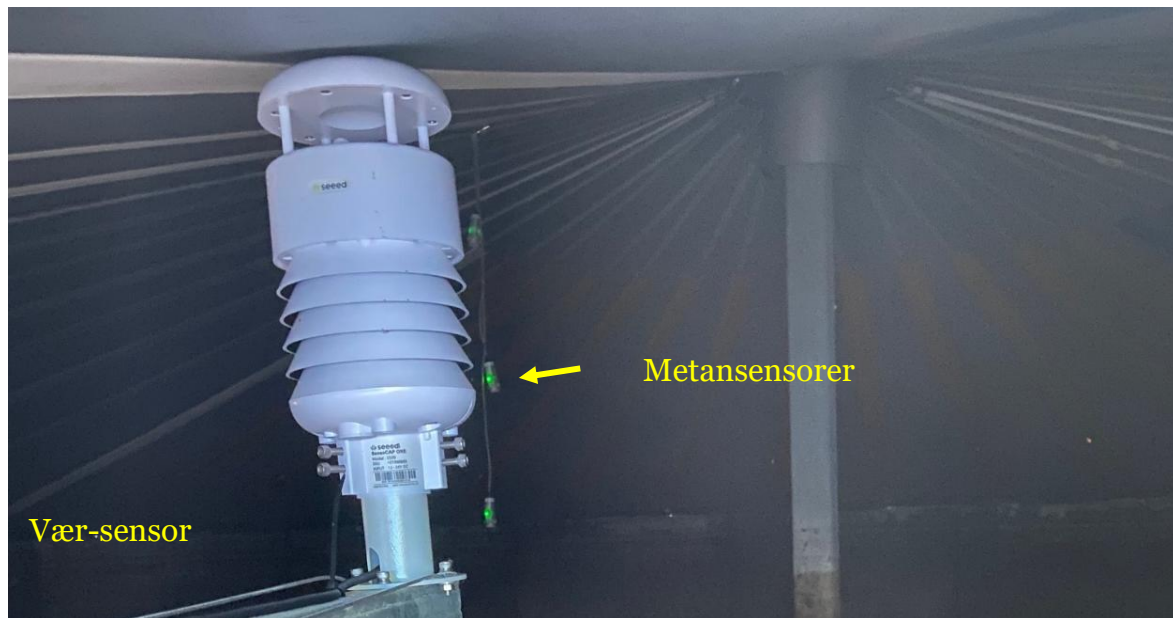
Temperatur ble kontinuerlig registrert i utelufta rett ved gjødsellageret og 0,5 og 1,5 meter under gjødseloverflata via temperatursensorer som ble festet til en kjetting som hang i en garnblåse på overflata. Sensorene var koblet til en trådløs datalogger (UBIBOT WS1 pro- 4G;[WS1-Pro-brosjyre.pdf](#)) med SIM-kort. Dataloggeren er batteridrevet. Ved hjelp av appen «UbiBotConnect» eller «UbiBot Control Panel» kunne temperaturmålingen overvåkes i sanntid henholdsvis via mobiltelefon eller pc. Temperaturene ble logget hver time gjennom hele døgnet. På grunn av problem med temperatursensorer, logger og sender eller batteri var det perioder hvor temperaturen ikke ble registrert. Det er mest fullstendige data for året 2022. Statistiske sammenligninger ble derfor gjort for dette året.



Bilde 7. Festing av sensorer til kjetting for temperaturregistreringer på 0,5 og 1 meters dyp. Blåsa sørger for at sensoren forblir på samme avstand i forhold til gjødseloverflaten. Foto: NORSØK

På Tingvoll gard ble det også registrert ute-temperatur og temperatur under taket på gjødselkummen med kompakte vær-sensorer (101990693 - SenseCAP ONE S500 5-in-1 Compact Weather Sensor, IP66, Seeed Studio [101990693 | Seeed Studio SenseCAP ONE S500 5-in-1 Compact Weather Sensor, IP66 | Distrelec Norway](#)). I tillegg registrerer disse luftfuktighet (%), lufttrykk (Pa), vindhastighet (m/s) og vindretning. Dette oppsett er en del av søsterprosjektet «Overvåking av

metanutslipp fra lager for bløtgjødsel og bioest (Metansensor) 2024-2026, Agros 245694» hvor høyoppløste CH₄ konsentrasjonsmålinger sammen med mikrometeorologiske målinger skal brukes for å estimere utslipp fra bløtgjødsellagre.



Bilde 8. Vær-sensor og metansensorer ble plassert rett under taket på gjødselkummen på Tingvoll gard. Foto V. Botterli, NORSØK

Samtidig med uttak av gassprøver med kammermetoden tok vi gjødselprøver for å bestemme tørrstoff og glødetap i gjødsla. Vi registrerte også avstand til gjødseloverflate, tykkelse og tørrstoffinnhold i skorpa og bedømte konsistens på den.

Ved hjelp av en gjødselprøvetaker utviklet ved RISE (Bilde 9) tok vi prøver fra fire dyp i hvert gjødsellager. Den øverste prøven var godt under eventuell skorpe. Prøvene ble blandet godt sammen og prosent tørrstoff og organisk stoff (VS) ble bestemt. Prøvetakeren er formet som et lite kammer som vi åpnet ved å dra i en snor der vi ønsket å ta prøven. Kammeret lukket seg automatisk. I dype gjødsellagre med mye gjødsel måtte vi forlenge skaftet for å få tatt de dypeste prøvene. Her var det også tungt å få åpnet kammeret.

Vi bedømte utseendet av hinne / skorpe på gjødseloverflaten visuelt. Vi vurderte om den var tett eller porøs, bløt eller tørr, dekkende eller med sprekker, bobler eller ikke. Tykkelsen på skorpa ble anslått med en spesialkonstruert målestav etter ide fra Lena Rodhe, RISE, 3 steder (Bilde 9). Målestaven har montert målbånd langs skaftet med 0 cm nederst. Målestaven ble trykket under skorpa. Vi vred på den så den fikk en ny posisjon. Deretter hevet vi den til vi kjente motstand fra skorpa og leste av tykkelsen på skorpa på målbåndet. Fordi det noen ganger var en glidende overgang mellom bløtgjødsel under skorpa og selve skorpa var det ikke noen eksakt bestemmelse. Størst usikkerhet var det der det var våt skorpe og / eller høyt tørrstoffinnhold i bløtgjødsla under.

Der det var tynn skorpe brukte vi et vanlig metermål til registrering av skorpetykkelse. Dersom skorpa var ca. 10 cm eller tykkere tok vi skorpeprøve, og bestemte tørrstoff og glødetap i den. Fordi skorpa kunne være ganske heterogen og varierte både i tykkelse og vanninnhold ulike steder i et gjødsellager og fra topp til bunn i skorpa, var det utfordrende å få tatt representative prøver av skorpa. Vi prøvde å ta prøvene nær der det ble tatt gassprøver. Prøvene ble dels tatt med skorpespaden (Bilde 9) og dels med en stikkspade der det var mer hensiktsmessig. Vi anslo volumvekt av skorpa ved å veie en liter skorpe, men det var vanskelig å få eksakte tall på dette. Der vi ikke fikk til å ta representative prøver som kunne brukes til volumvektbestemmelse brukte vi en anslått gjennomsnittlig volumvekt på 1,05 kg/dm³ skorpe basert på gjennomsnitt av våre registreringer.

Total mengde organisk stoff (VS) i et gjødsellager ble beregnet som kg organisk stoff i bløtgjødsel og skorpe etter følgende formel:

$$VS \text{ (kg)} = (A * H_f * v_v_f * 1000 * \%TS_f / 100 * \%VS_f) + (A * H_s * v_v_s * \%TS_s * \%VS_s)$$

A=areal av gjødsellager (kvadratmeter); H=aktuell gjødselhøyde (meter); f=flytende gjødsel; s=skorpe; vv=volumvekt (tonn/m³, for flytende gjødsel er den satt lik 1); 1000=omgjøring fra tonn til kg; % TS= prosent tørrstoff i gjødsel; % VS= prosent organisk stoff i tørrstoffet. Der skorpa var for tynn til å bli tatt prøve av ble H_f satt lik total gjødselhøyde.

Fordi det var stor variasjon i % TS i gjødsla (fra 1,7 til 10,6%) justerte vi gjødselvolumet slik at det tilsvarte et volum med 6 % TS. 1 000 m³ med 2 % TS tilsvarer 333 m³ med 6 % TS og 1 000 m³ med 8 % TS tilsvarer 1 333 m³ med 6 % TS. Det var dette volumet vi brukte når vi beregnet utslipp av lystgass og metan per m³ gjødsel for å kunne sammenligne med andre undersøkelser.

I forbindelse med utprøving av metansensorer monterte vi en laser for å måle avstand til gjødseloverflata (Optisk nivå sensor O1D300, [O1D300 - Optisk nivå sensor - ifm](#)). Laseren hadde en oppløsning på 1 mm og lastet ned data hvert 10 minutt. Den fungerte svært godt i de kummene der vi testet den ut. Også data fra laseren ble tilgjengelig på telefon og lastet ned i Excel.



Bilde 9. Fra venstre: gjødselprøvetaker i bruk og i nærbilde, målestav til å bestemme skorpetykkelse, skorpespade og laser for å bestemme avstand til gjødseloverflate. Foto: NORSØK.

2.2.3 Klimagasser

2.2.3.1 Kammermetode kombinert med gasskromatograf

Vi prøvde å ta ut gassprøver en gang i måneden, men i perioder var dette vanskelig å få til. På grunn av høye arbeidskostnader ved å ta ut gassprøver, valgte vi sjeldnere uttak og på færre gårder mot slutten av perioden. Utfordringer med sjeldne og ikke kontinuerlige prøveuttak er belyst og diskutert i kap. 4.1 (Metodiske utfordringer).

Vi brukte tette kammer som ble passert oppå gjødseloverflata for å registrere hastigheten på strømmen av gassene CO₂, N₂O og CH₄ fra gjødsla. Kamrene er laget i aluminium, har to flytepontonger på hver side og en 5 m gasstett slange i teflon (PTFE fra Kartell, artikkel nummer KART3902, 4 mm indre diameter) er koblet på toppen av kammeret. Totalt indre volum i teflonslangen var 63 ml. I andre enden av teflonslangen er en treveis-ventil festet til en 20 ml sprøyte. Gassboksen er 49,7 cm lang, 39,2 cm bred og 25 cm høy. Innvendig volum er 0,0351 m³ når flytepontongene er i øverste stilling og de stikker 8 cm under gjødseloverflaten. Kamrene ble utviklet i et tidligere prosjekt (Ebbesvik m.fl. 2021) og laget av Sito Mek AS på Tingvoll. Mellom hver serie med uttak av gassprøver ble kassen heist opp og luftet i noen minutter før den ble senket ned på overflaten igjen. De tre seriene ble tatt fra ulike steder på gjødseloverflaten.

Sprøyten ble brukt til å sugе luft ut av kammeret ved 0; 2,5; 5; 7,5; 10; 20; 30 og 40 minutter etter at kammeret var senket forsiktig ned på gjødsla. Etter hvert kuttet vi ut siste måling på 40 minutter. Før vi tok en gassprøve ble slangen tømt for luft. Dette ble gjort ved å fylle sprøyten 5 ganger og tømme ut innholdet før gassprøve ble tatt. Ved å sugе luft 5 ganger a 20 ml = 100 ml for hver gassprøve lagde vi et undertrykk i kammeret. Dette kan ha bidratt til ekstra frigjøring av gass fra gjødsellageret. Den sjettede gangen vi sugde luft fra kammeret ble 15 ml av innholdet i sprøyta fylt i vakumerte 12 ml prøveglass med tett gummipakning (septum, Model 10-CV-Crimp, Chromacol, Herts, UK). Gassprøvene ble analysert for konsentrasjon av metan (CH₄), lystgass (N₂O) og karbondioksid (CO₂) med gasskromatograf (GC, Model 7890A, Agilent, Santa Clara, CA, US, Hansen, m.fl. 2014) ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) på Ås. Forandringer i gasskonsentrasjoner over tid brukes til å estimere utslippshastighet fra gjødsla for de ulike gassene. Vi antok at utslipp skjer gjennom molekylær diffusjon og brukte lineær regresjon. På grunn av usikkerhet i bestemmelse av gassutslipp spesielt der det var skorpe eller hinne på gjødsla sammenlignet vi beregnet utslipp av metan ved 0-10 minutter, 10-30 minutter, 0-20 minutter og 0-30 minutter etter at vi plasserte kammeret forsiktig ned på gjødsla og valgte den vinkelkoeffisienten som gav best forklaring (høyest R²). Det sammenfalt i de aller fleste tilfellene med de høyeste estimatene for metanutslipp. Vi hadde problem med en dårlig evakuering av luft i noen prøveglass. Usannsynlige verdier ble derfor tatt bort før beregning.

Skorpe gav noen metodiske utfordringer med uttak av gassprøver. Ved tykk skorpe ble kammeret liggende oppå skorpa uten å stikke hull på den selv om kammeret ble presset ned i skorpa. Eventuell

gass under skorpa ble da ikke frigjort. Fordi skorpa som regel er ru, var det også vanskelig å unngå gliper mellom kammer og skorpe. Dette kan ha ført til luftveksling mellom kammer og omgivelser og dermed en risiko for lavere registrerte utslipp gjennom skorpa enn det som var reelt. For å bøte på det siste lagde vi et kammer med en kappe rundt for å hindre gassutveksling. Denne brukte vi der kammeret kunne flyte opp på skorpa. Ved tynn skorpe eller hinne på gjødsla som ikke bar kammeret, fikk vi en skorsteinseffekt når vi satte ned kammeret slik at gassen under raskt ble frigjort. Vi registrerte dermed en større utslippshastighet enn det som var reelt. Dette fikk vi bekreftet ved å ta gassprøver med kammer som flyter opp på skorpa, og har en kappe rundt seg, før vi tok gassprøver med kammer som vi presset ned i gjødsla. Der det var tynn skorpe eller hinne, trengte kammeret uansett gjennom. Som supplement sammenlignet vi konsentrasjonen av CH₄, N₂O og CO₂ rett over overflaten før kammer ble satt ned på gjødsla, og konsentrasjonen i kammeret straks det ble satt ned. Gasskonsentrasjon i lufta over gjødsla og i kammeret ved nedsetting skal i prinsippet være det samme. En høyere konsentrasjon i kammeret straks det ble satt ned enn utenfor, tok vi som bekræftelse på frigjøring av gass under skorpe/hinne som følge av at vi lagde hull på den. Vi fikk da en rask frigjøring av gass fra bobler med gass under skorpa. Dette er i motsetning til diffuse utslipp hvor gass diffunderer gjennom gjødsel og skorpe kontinuerlig.



Bilde 10. Uttak av gassprøver ved hjelp av kammer på gjødsellagre. I de to bildene til venstre har kammeret skåret gjennom overflaten, mens kammeret til høyre hviler opp på gjødselskorpa og har ei kappe rundt for å hindre gassdiffusjon. Foto: NORSØK

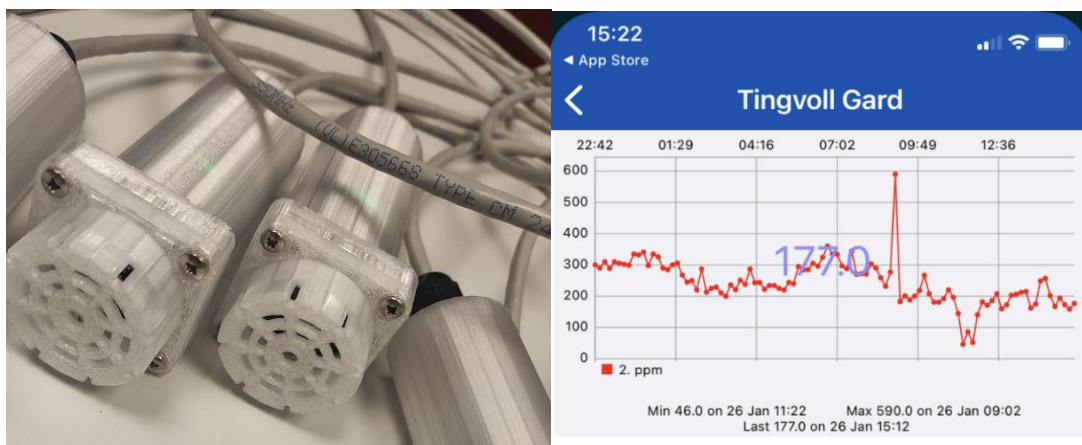
I slike undersøkelser som de vi har gjort her er det ønskelig å beregne MCF (Methane Conversion Factor). Den beregnes som summen av metanutslipp oppgitt som CH₄-C per kg organisk stoff som tilføres gjødsellageret (IPCC, 2006) og divideres med B₀ (maksimal kapasitet for metanproduksjon). Det skjer en kontinuerlig omdanning av organisk materiale på et gjødsellager. Selv om vi har øyeblikksbilder av innholdet av organisk materiale i gjødsellagrene har vi ikke data på hvor mye organisk stoff som ble tilført gjødsellagrene via gjødsel, fôrrester, strø og annet og kunne derfor ikke beregne MCF.

Ved beregning av oppvarmingseffekt i kg CO₂-ekvivalenter brukte vi volumvekt for omregning av CO₂-C, N₂O-C og CH₄-C til CO₂, N₂O og CH₄. Basert på IPCC (2019) brukte vi en omregningsfaktor fra N₂O til CO₂-ekvivalenter på 265 og fra CH₄ til CO₂-ekvivalenter på 28.

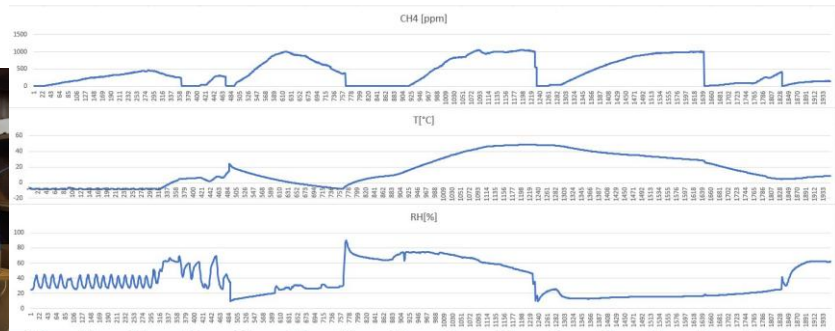
2.2.3.2 Metansensor

Fordi vi i tidligere undersøkelser (Ebbesvik m.fl. 2021) og i SkitGass fant at utslipp av metan var den gassen som betydde mest for klimagassutslipp fra våre gjødsellager, bestemte vi oss for å teste om vi kunne bruke en rimelig metansensor til å kontinuerlig registrere endringer i metankonsentrasjon i luften over gjødsle. Kontinuerlig registrering av CH₄-konsentrasjon over gjødsle, særlig i kummer med tak, vil gi mulighet å se når utslippene skjer og legge grunnlag for å estimere totalutslipp fra hele kummen med hjelp av mikrometeorologiske modeller.

En halvleder metansensor (MOS-type sensor Figaro TGS 2611-E00) ble koblet til mikrokontroller sammen med en temperatur- og fuktighetssensor og testet i et kammer med kjent konsentrasjon av CH₄ i luften ved varierende temperatur og luftfuktighet. Dette for å finne en kompensasjonsalgoritme som tillater å korrigere målt CH₄-konsentrasjon ut fra temperatur og fuktighet. Kalibreringssystemet bestod av et klimakammer, en luftfukter, en referanse-gassanalysator (Picarro), et metandoseringsystem og et LabView-program for datainnsamling, analyse og kalibrering. Det ble også utviklet ekstra komponenter for kommunikasjon med en sentralenhet. Sentralenheten kommuniserer også med andre typer sensorer (laser, vær). Alle målte verdier overføres fra sentralenheten via en 4G-forbindelse til en server, hvor data kan lastes ned og overvåkes i sanntid på en PC eller mobiltelefon. NMBU, REALTEK sammen MINA har utviklet programvare for sensorer og sentralenhet. Komponentene ble designet og produsert med 3D-printing. Målingene ble samlet inn over flere dager. Basert på nøyaktig konsentrasjon av metan, samt målt temperatur og fuktighet, ble koeffisientene for korreksjon av MOS-sensoren beregnet. Målet var en sensor som beregner en metankonsentrasjon som er tilnærmet riktig uavhengig av ekstern temperatur og fuktighet.



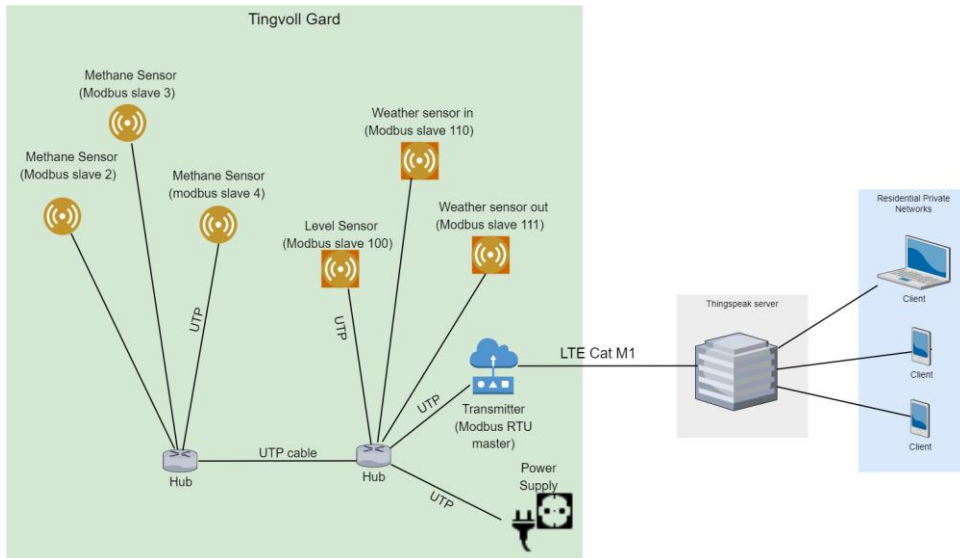
Bilde 11. Komponenthus med metansensorer til venstre. Foto: M. Jakovljevic. Til høyre eksempel på registrering av metankonsentrasjoner lastet ned på mobiltelefon.



Bilde 12. System for kalibrering av metansensorer. Foto: M. Jakovljevic

Det ble laget 9 sensorer for registrering av metankonsentrasjon. Tre metansensorer ble installert i hvert av tre ulike gjødsellagre. Lager 1 er gjødselkjeller med åpen forbindelse til fjøset. Det var vanskelig å registrere metanutslipp fra gjødsellager 1, da vifte i taket sugde luften ut gjennom ristene i fjøset. Disse var et stykke unna der det var mulig å plassere metansensorer. Vi har derfor ingen resultater fra dette lageret. På gårdene med gjødselkum ble det koblet en laser som registrerte avstand til gjødseloverflaten til sentralenheten. På lager 6 har registreringene av metan vært stabile, med minst to sensorer med samme verdi på registreringene.

På Tingvoll gard (lager 8) ble det i tillegg koblet til to klimasensorer (2.2.1). Det viste seg at dette ble ustabil, med hyppige utkoblinger av en eller flere sensorer. Det ser ut til at kommunikasjonen mellom sentralenheten og sensorene er ustabil, og på Tingvoll har det vært flere perioder hvor en eller flere sensorer ikke har registrert data. Metansensorene var også følsomme for det aggressive miljøet og noen sluttet å virke etter noen måneder.



Figur 1. Koblingsskjema for sensorer i gjødselkummen på Tingvoll gard.

2.2.3.3 GA 5000



Vi målte konsentrasjonen av ulike gasser over gjødseloverflata med Biogas5000 Gas Analyser før vi tok ut gassprøver med kammermetoden. De ble registrert som volumprosent metan (CH₄), karbondioksid (CO₂), og oksygen (O₂) og ppm ammoniakk (NH₃) og hydrogensulfid (H₂S). Vi gjentok målingene tre ganger. Disse gassregistreringene ble ufullstendige pga perioder med reparasjon av GA5000.

Bilde 13. Biogas5000 Gas Analyser (Geotech: <https://cadmus.co.uk/geotech-bioqas-5000-portable-analyser>). Foto: NORSØK

2.3 Statistikk

Statistiske beregninger ble gjort med Mintab versjon 22.2.1. Minitab ble også brukt til å lage de fleste figurene i rapporten. General linear model (GLM) ble brukt til å beregne effekt av gjødsellagertype på temperatur i gjødsel. Vi beregnet temperatureffekt på gjennomsnittsverdi for temperaturer ved 50 og 150 cm dyp for å kompensere for manglende verdier når vi bare hadde en av temperaturene. Om sommeren var det dessuten mindre enn 150 cm mellom toppen av gjødsel og bunn i de fleste gjødsellagere. Gjødsellagertype ble behandlet som fast effekt og dato og utetemperatur som kovariat. Ved signifikant effekt av gjødsellager brukte vi Tukey test (Tukey Pairwise comparison) for å teste forskjell mellom gjødsellager.

Det ble brukt multipel lineær regresjon, stepwise for grupper av gjødsellagere og for hver gård for å identifisere hvilke faktorer som hadde sterkest effekt på skorpetykkelse, utslipp av lystgass og metan. Utslipp av lystgass og metan var ikke normalfordelt. Vi transformerte derfor verdiene med Box—Cox transformation Optimal λ før vi gjorde regresjonsberegninger. For lystgass brukte vi $\mu\text{g N}_2\text{O-N per m}^3$ og time som responsvariabel og la til 1 000 før transformering for å unngå negative verdier (Optimal $\lambda = -2,33$). Vi undersøkte bare verdier for lystgassutslipp i regresjonsberegningen når det samtidig var 10 cm skorpe eller mer på gjødsel i gjødsellagere med ubehandlet bløtgjødsel. Kontinuerlige inngangsverdier var pH, temperatur i 50 cm dybde i gjødsellageret, cm skorpe og %TS i skorpe. Kategoriske verdi var gjødsellager. For metan brukte vi responsvariabel $\mu\text{g CH}_4\text{-C per time og kg VS i gjødsellageret}$ (Optimal $\lambda = 0,11$). Kontinuerlige inngangsverdier var pH, temperatur i 50 cm dybde i gjødsellageret, mengde gjødsel på lager uttrykt som kg VS under en m² overflate og % VS i bløtgjødsel. Kategoriske verdier var gjødsellager, dato og bruk av brønnvann. Fordi det var så store individuelle forskjeller mellom hvert gjødsellager, brukte vi hvert gjødsellager som en faktor og delte den ikke opp i grupper av gjødsellager.

3 Resultat

3.1 Temperatur

Vi fant en gjennomsnittlig årstemperatur på 8,4 °C i gjødsellagrene på gårdene i dette prosjektet. I to gjødsellagre var temperaturen under 7 °C (6,5 og 6,6 °C), mens i tre lager var gjennomsnittstemperaturen over 10 °C (10,7; 11,1; 13,0°C). Temperaturene i alle gjødsellagrene var som regel lavere enn 15 °C (Figur 2). Om våren og sommeren var temperaturen i gjødsla ofte lavere enn lufttemperaturen ute, mens det var omvendt om høsten og vinteren. Gjødsla var også varmere om sommeren enn om vinteren, og varmest der det var minst gjødsel på lager. Gjødsla var varmest i august med en gjennomsnittstemperatur på 13,8 °C i 2022. I september og juli var det i gjennomsnitt 13,1 °C. Høy temperatur sammenfaller med perioder hvor det var lite gjødsel på lager.

Til tross for nedkjølingssteg var det varmere gjennomsnittstemperatur i lager med biorest enn i lager uten biorest ($p < 0,05$) både for hele året og for de 6 varmeste månedene i gjødsellageret (mai-oktober) i 2022. Det var varmere der ny gjødsel ble tilført i bunnen i utendørs kum enn der ny gjødsel ble tilført ovenfra eller i kjeller ($p < 0,05$). Tak over gjødsellager så ikke ut til å påvirke temperaturen i gjødsla sterkt, men vi hadde bare et lager med tak med ny gjødsel tilført ovenfra og det var en mørk grønn presenning. Vi registrerte at det ble svært varmt i dette lageret når sola skinte på kummen om sommeren.

Det var for ufullstendige data til at vi kunne regne statistikk på effekt av ulike typer gjødsellagre i 2023, men figur 3 viser noe av variasjonen mellom ulike lagre. Tykkelse på skorpa påvirket gjødseltemperaturen både i 50 cm og 150 cm dybde. Det var lavere temperatur i gjødsla med stigende skorpetykkelse ($p < 0,05$). Skorpedata ble undersøkt på de gårdene der vi målte gass. Vi brukte skorpetykkelse og temperaturen i gjødsla den dagen vi tok gassprøver for å undersøke sammenhengen mellom temperatur og skorpetykkelse.



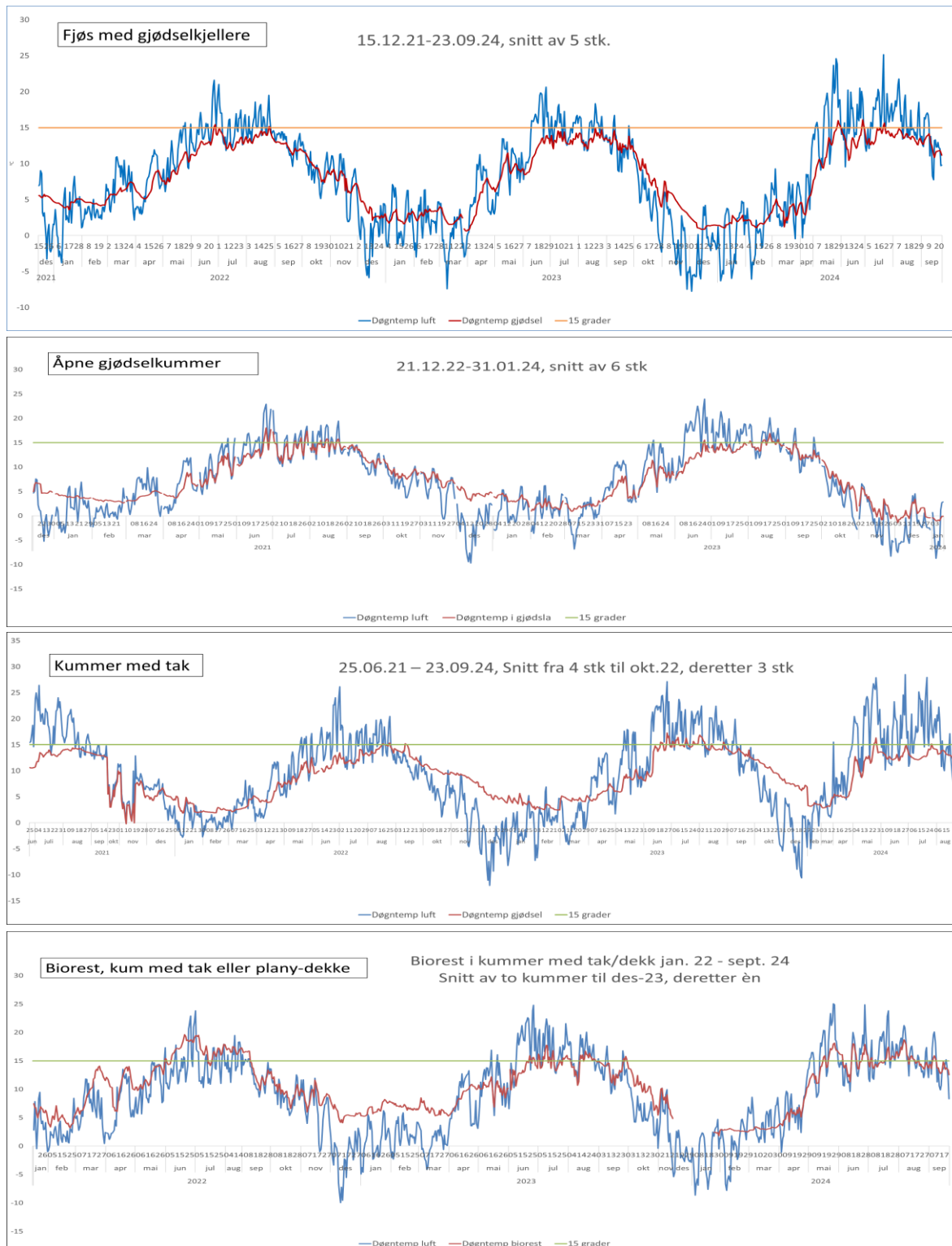
Bilde 14. Skorpe på gjødsla, dypt nedgravd kum eller kjeller og lyst tak er eksempler på faktorer som kan redusere temperatur i gjødsla når det er varmt. Foto: NORSØK

Tabell 2. Gjennomsnittlig temperatur i gjødsla i ulike gjødsellagre, °C (gjennomsnitt for antall registreringer og gjennomsnitt for 50 og 150 cm gjødseldyp). Antall dager er dager hvor temperaturen er registrert i hvert av gjødsellagrene summert for gjødsellagrene i den aktuelle gruppa Gj.-snitt= aritmetrisk gjennomsnitt, StAv = standardavvik; min = minimumstemperatur; maks = maksimumstemperatur for den perioden det ble gjort målinger. Perioden varierte mellom gjødsellagrene. Gj.-snitt_{Korr} = gjennomsnitt i samme periode korrigert for variasjoner i lufttemperatur. T= Tukey test for måleperioden og Ts for de 6 varmeste månedene² (p<0,05). Lik bokstav indikerer at gjennomsnittlig temperatur i gjødsellagrene ikke er forskjellig fra hverandre. SoGj.-snitt_{Korr} = gjennomsnitt for de 6 varmeste månedene² korrigert for lufttemperatur.

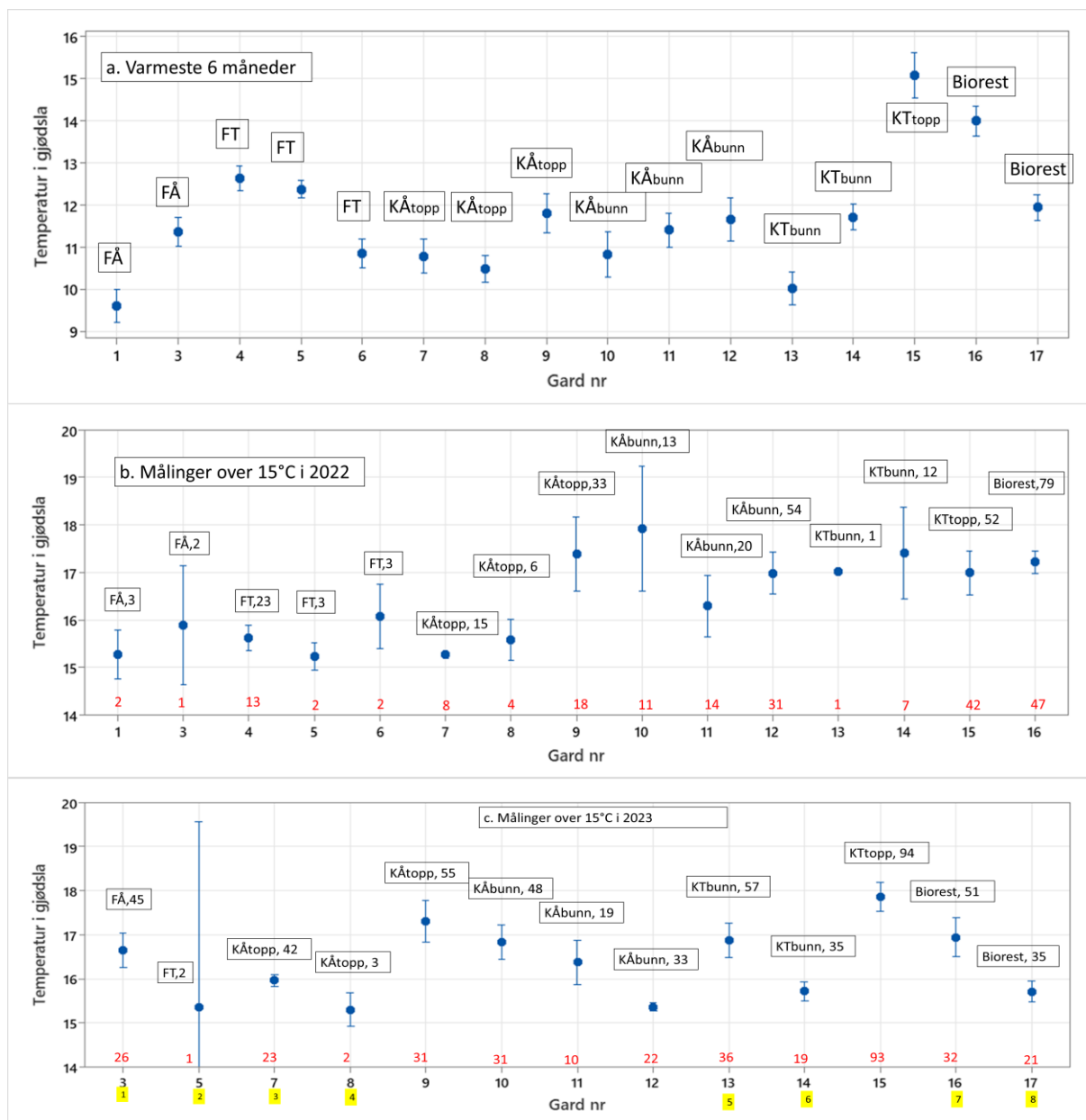
Gjødsellager	Antall dager	Antall Lagre	Gj.-snitt	StAv	Min	Maks	Gj.-snitt _{Korr}	T	SoGj.-snitt _{Korr}	Ts
KD_topp_bior	673	1	11,1	4,0	1,4	20,9	10,6	a	13,8	a
KT_topp ¹	732	2	10,6	5,0	-0,3	21,0	9,6	b	12,9	b
KT_topp_bior ¹	624	1	9,5	4,9	1,8	18,7	8,9	c	12,1	c
KT_bunn	1520	2	9,1	4,3	0,5	20,9	8,8	c	10,4	f
KÅ_bunn	1811	3	8,2	4,9	-0,2	22,0	8,4	d	11,4	de
FT	1742	2	8,8	4,2	0,3	17,2	8,2	d	11,7	cd
FÅ	1580	3	7,4	4,8	-4,2	20,4	7,9	e	11,0	e
KÅ_topp	2366	3	6,9	5,4	-12,5	22,8	7,7	e	11,5	d

¹Et av lagrene er samme gjødselkum (Tingvoll gard), men målingene er gjort på ulike tidspunkt).

²April, mai, juni, juli, august og september. F er gjødselkjeller under fjøs med ny gjødsel tilført over gjødseloverflaten, FT= tett forbindelse mellom kjeller og fjøs, mens FÅ er åpen forbindelse. K= Gjødselkum. KD_topp_bior = Biorest, kum med plany-dekke, ny gjødsel tilført over gjødseloverflaten; KT_topp_bior = Biorest, kum med tak, ny gjødsel tilført over gjødseloverflaten; KT= Kum med tak; KÅ = Åpen kum; topp = ny gjødsel tilført ovenfra.



Figur 2. Gjennomsnittlig temperatur i gjødsla, °C (gjennomsnitt for antall registreringer type gjødsellager og gjennomsnitt for 50 og 150 cm gjødseldyp). Rød strek er temperatur i gjødsla, blå strek utetemperatur og rett strek 15 °C.

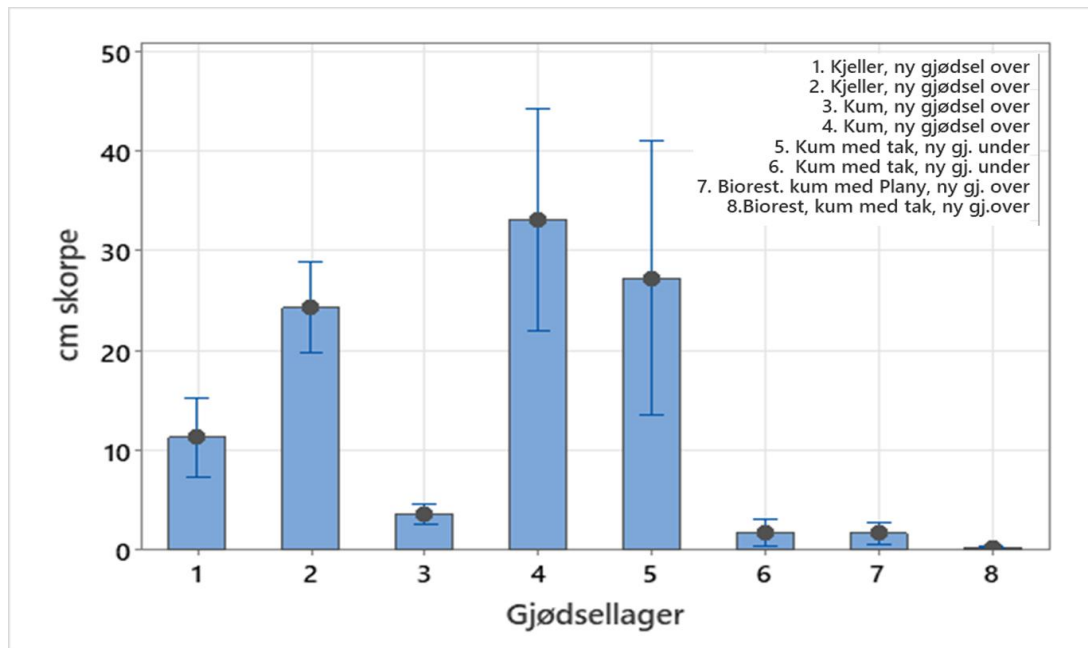


Figur 3. Gjennomsnittlig temperatur i gjødsle ulike gjødsellagre (°C) (gjennomsnitt for antall registreringer og gjennomsnitt for 50 og 150 cm gjødseldyp). a. For de 6 månedene i sommerhalvåret (april, mai, juni, juli, august, september) for alle år i perioden 25.06.2021 – 23.09.2024. b. Gjennomsnitt av alle målinger over 15 °C i gjødsle i 2022. c. Gjennomsnitt av alle målinger over 15 °C i gjødsle i 2023. Loddrett linje indikerer 95 % konfidensintervall. Der det er et stort konfidensintervall er det få registreringer over 15 °C eller stor variasjon i temperaturene. Numrene etter betegnelsene er antall dager hvor gjennomsnittstemperaturen er over 15 °C. Forkortelsene er forklart i tabell 2. De røde numrene ved hvert gardsnr. er prosent av registreringene i sommerhalvåret som er over 15 °C. Nummer på gjødsellager hvor det er gjort gassmålinger er merket med gult og har nummerering merket gult der gassresultatene er gjengitt (3.3.1 og 3.3.2).

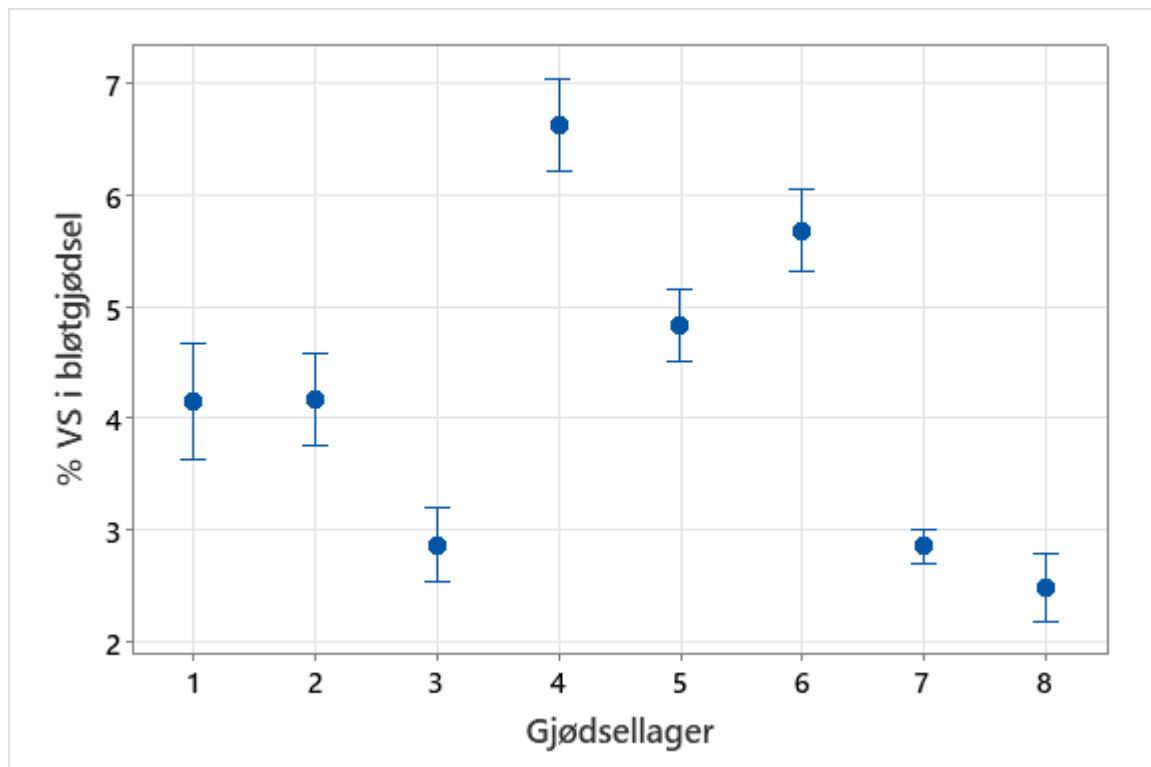
3.2 Gjødselegenskaper

I gjødsellagrene med biorest (7 og 8) fant vi lite eller svært ufullstendig skorpedannelse. For ubehandlet bløtgjødsel var det tydeligst skorpedannelse der gjødsla var lagret i kjeller eller i utendørskum med tak, men det var noen unntak (Figur 4). Vi fant at tykkelsen på skorpa økte med mengden organisk stoff (VS) nedenfor en m² gjødseloverflate i lageret ($p < 0.001$). Denne var i sin tur et resultat av høyde på bløtgjødsel, skorpe og prosent VS i bløtgjødsel og skorpe. Det var ulike behandling og ulike mengder vaskevann som ble tilført gjødsellagrene, og det var stor variasjon i prosent tørrstoff og VS i gjødsla (Figur 5). Det var ingen tydelig sammenheng mellom mengde kraftfôr per 100 kg EKM (Energikorrigert melk) og tykkelse på skorpa. De to gårdene med gjødselkjeller hadde begge tydelig skorpedannelse. Skorpa var tørrest i overflata der gjødsla var under tak, men når det var finvær mange dager i strekk om sommeren var det også tørr skorpeoverflate i utendørskum. Noen ganger var det markant skille mellom bløtgjødsel og skorpe og noen ganger en mer glidende overgang. Dette varierte både gjennom året og mellom ulike gjødsellagre.

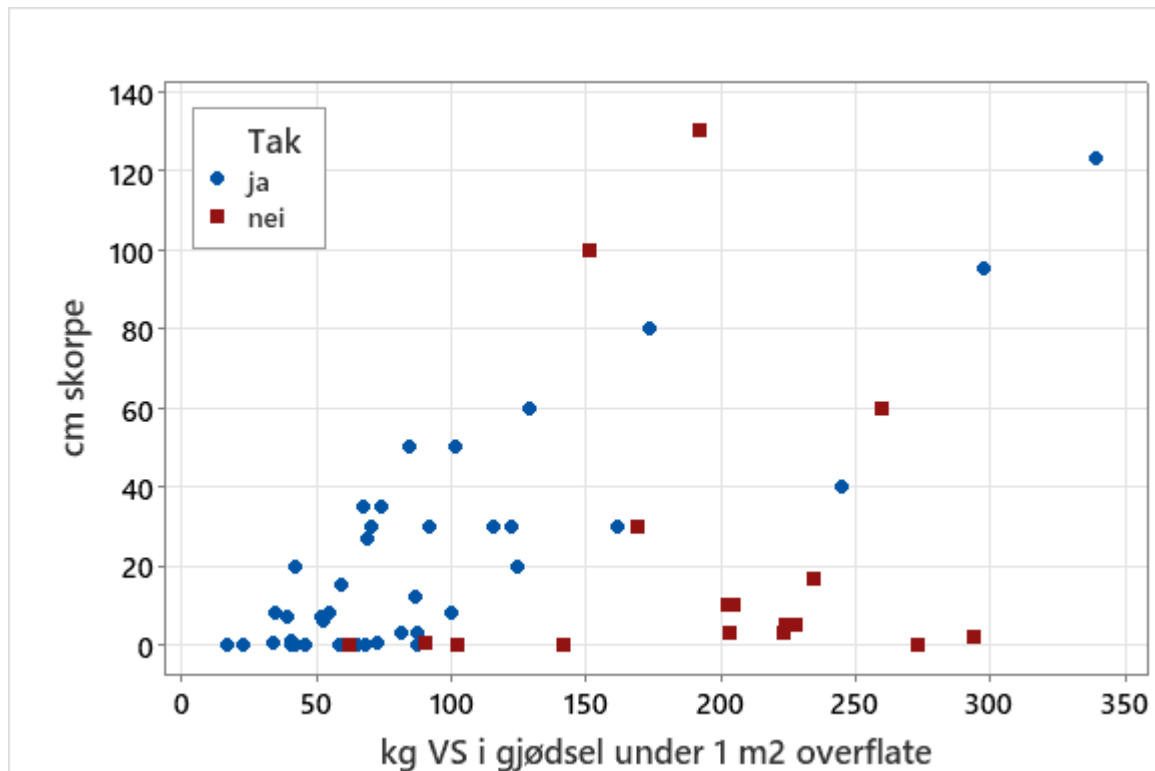
Til tross for nesten samme høyde på gjødselkjelleren (1,9 og 1,95 m, Tabell 1) var det tykkere skorpe i gjødsellager 2 enn i 1. Det skyltes at gjødsla ble oftere omrørt i lager 1 enn i lager 2 på våren og det var mer gjødsel på lager om sommeren i lager 2 enn i lager 1. Gjødsellager 3 fikk tilført ny gjødsel ovenfra, og kummen ble hyppig tømt. Her var det aldri tykk skorpe, men på varme sommerdager var det noen ganger ei tett hinne eller tynn skorpe som var ganske tørr i overflata. Gjødsellager 4 fikk også ny gjødsel ovenfra og vi hadde forventet samme skorpedanning som i gjødsellager 3. Tykk skorpe i gjødsellager 4 skyldes antakelig at lettflytende gjødsel ble sugd opp og flyttet fra denne kummen til et annet gjødsellager uten at gjødsla ble rørt opp. I perioder når kummen var full ble det ikke tilført ny gjødsel. Det var et gjennomsnittlig innhold av tørrstoff på 8,2 % og VS på 6,6 %. Overgangen mellom skorpe og bløtgjødsel var diffus. I gjødsellager 5 ble ny gjødsel tilført fra bunnen og taket beskyttet mot nedbør. Her var det en kraftig skorpedanning og vi fant over 120 cm skorpe i dette lageret på det meste. Det var et tydelig skille mellom bløtgjødsel og skorpe. Det var et gjennomsnittlig innhold i gjødsla på 6,5 % tørrstoff og 4,8 % VS. I gjødsellager 6 ble det tilført ny gjødsel i bunnen, men det var lite skorpedannelse. Det var et gjennomsnittlig tørrstoffinnhold i gjødsla på 7,4 % og VS på 5,7 %. I stedet var gjødsla ofte full av bobler (bilde 5). Årsaken til disse boblene er antakelig at gårdbrukeren har tilført en type svært finmalt flytende kalk, men vi kjenner ikke hele årsakssammenhengen da også gård 3 har tilført denne kalken, men her var det færre bobler.



Figur 4. Gjennomsnittlig skorpetykkelse i ulike gjødsellagre for bløtgjødsel. Loddrett linje indikerer 95 % konfidensintervall. På gård 7 tok vi bare prøver i 2022 og på gård 8 ble de fleste prøvene tatt i 2024.



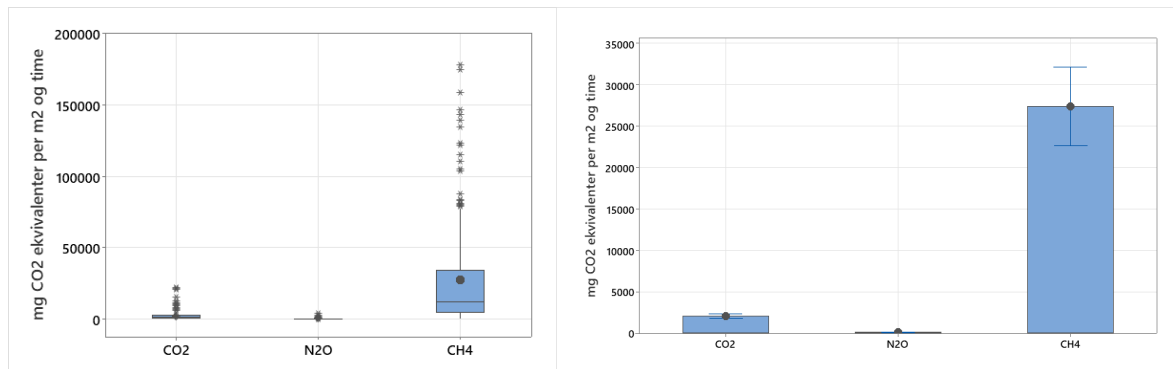
Figur 5. Prosent organisk stoff (% VS) i bløtgjødsel som ligger under skorpa i ulike gjødsellagre. Loddrett linje indikerer 95% konfidensintervall. Samme nummer på gjødsellager som i Figur 4.



Figur 6. Sammenheng mellom skorpetykkelse og mengde organisk stoff (VS) i gjødsel under skorpa når prøven ble tatt. Her er bare gjødsellagre med tydelig skorpe tatt med (Gjødsellager 1,2,4,5). Hvert punkt representerer skorpetykkelse den dagen det ble tatt gassprøver.

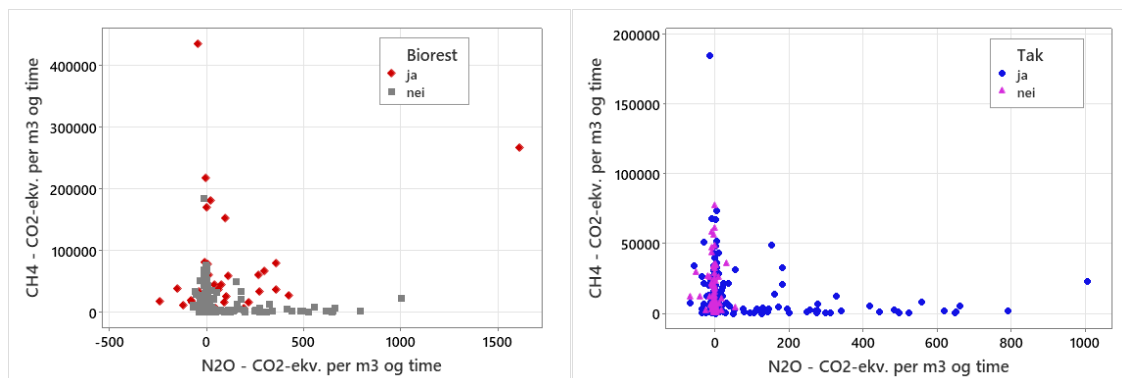
3.3 Klimagassutslipp

Metan var den gassen som betydde mest for utslipp av klimagasser fra lager for bløtgjødsel (Figur 7 og Tabell 3). Det var stor variasjon i utslipp av CH₄, N₂O og CO₂ gjennom sesongen og mellom ulike lagre (Tabell 3). Det er flere registreringer av lystgass og karbondioksid enn metan fordi det for noen av metan-prøvene var mer sprikende konsentrasjoner av metan registrert i prøvene enn for lystgass og karbondioksid. Dette gjorde at det var flere tilfeller for metan hvor det ikke var mulig å finne en logisk sammenheng mellom metankonsentrasjon og prøvetakingstid.



Figur 7. Utslipp av karbondioksid (CO_2), lystgass (N_2O) og metan (CH_4) registrert ved kammermetoden og oppgitt som mg CO_2 ekvivalenter per m^2 gjødseloverflate og time. Grafen til venstre viser median (strek), gjennomsnitt (svart prikk) og 25 og 75 % kvartiler. Fire verdier for metan mellom 300 000 og 500 000 vises ikke. Grafen til høyre viser gjennomsnitt. Loddrett linje indikerer 95 % konfidensintervall. Beregning av CO_2 -ekvivalenter er oppgitt i kap. 2.2.3.

For biorest fant vi i noen uttak utslipp av lystgass og metan samtidig fra gjødsellager 8, men fra gjødsellager 7 var det bare svært små utslipp av lystgass (Figur 12). For ubehandlet gjødsel var det i de fleste tilfelle relativt små utslipp av metan når utslippet av N_2O var større enn 200 g CO_2 -ekvivalenter per m^3 gjødsel og time. For de aller fleste uttak av gassprøver betydde likevel utslippet av lystgass lite i forholdet til utslippet av metan (Figur 8).



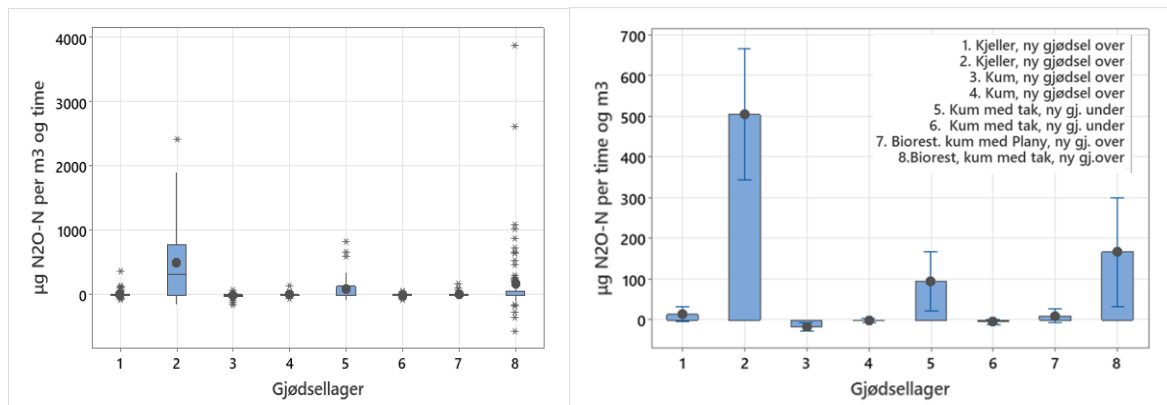
Figur 8. Utslipp av metan (CH_4) versus utslipp av lystgass (N_2O) omregnet til mg CO_2 -ekvivalenter per time og m^3 gjødsel omregnet til 6 % tørrstoff. Hvert punkt representerer et uttak som er en registrering av utslippshastighet med gassprøver fra kammer basert på en serie med gassprøver (detaljer i 2.2.2.1). Det er tre uttak fra samme gjødsellager og dato. Grafen til venstre er basert på uttak fra alle gjødsellagre. Det er to gjødsellagre med og seks uten biorest. Grafen til høyre er fra prøver fra gjødsellagre uten biorest. Gjødsellager med tak er enten en gjødselkjeller eller en kum med PVC-tak. Det er fire gjødsellagre med tak og to uten.

Tabell 3. Utslipp av karbondioksid (CO₂), lystgass (N₂O) og metan (CH₄) registrert ved kammermetoden og oppgitt som mg CO₂-ekvivalenter per time og m³ gjødsel omregnet til 6 % tørrstoff for alle prøver og for hvert gjødsellager. Antall representerer antall uttak. Forklaring av uttak, se Figur 8 og gjødsellager Figur 9.

Gass	Gjødsellager	Antall	Median	25 % kvartil	75 % kvartil	Mean	Min.	Maks.
CO₂	Alle	387	601	288	1381	1092	9	11209
	1	45	748	293	1183	831	9	2855
	2	56	685	389	1681	1708	72	11209
	3	43	952	434	1455	1241	57	5023
	4	61	254	131	569	453	12	5214
	5	37	549	181	1463	875	32	3563
	6	49	420	237	732	532	87	2809
	7	21	1633	921	2446	2204	246	8037
	8	75	719	353	1658	1384	55	10072
N₂O	Alle	387	-1	-5	9	44	-238	1617
	1	45	1	-4	5	6	-31	153
	2	56	131	-1	324	210	-66	1007
	3	43	-3	-10	-1	-7	-67	31
	4	61	-1	-3	1	0	-26	54
	5	37	-3	-6	55	40	-36	342
	6	49	-1	-3	2	-2	-34	24
	7	21	-1	-4	2	5	-9	66
	8	75	-1	-7	14	51	-238	1617
CH₄	Alle	380	5454	1554	19586	16641	2	434648
	1	45	19174	4077	35206	22317	2	73378
	2	54	5352	1355	14144	12515	136	184469
	3	43	18950	8975	33954	23197	212	76613
	4	61	1705	948	3549	3491	116	35036
	5	37	4788	1492	12530	8992	110	42990
	6	46	1728	1109	4005	3918	81	34516
	7	21	22713	14357	33897	44807	4336	217199
	8	73	8311	3432	24227	27110	490	434648

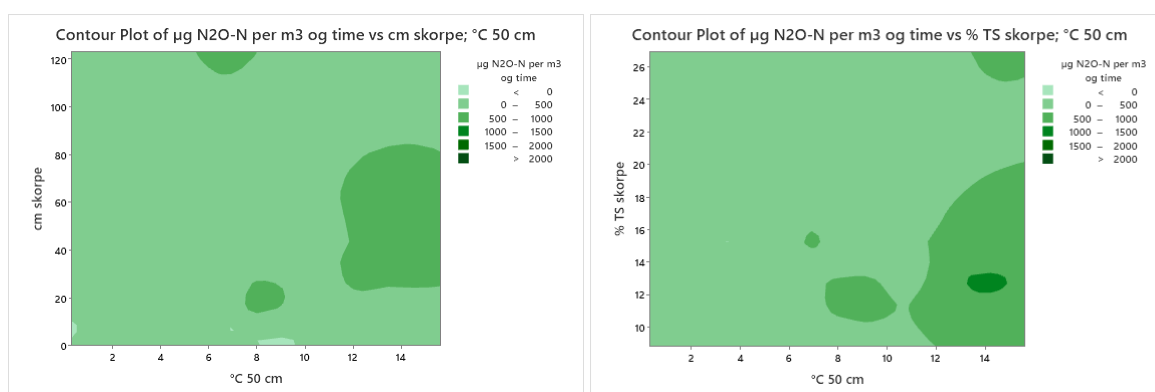
3.3.1 Lyststgass

Med unntak av gjødsellager 2, 5 og 8 var det svært små utslipp av lystgass (Figur 9). Lystgassutslipp fra gjødsellager 2 skjedde i stor grad om sommeren. Fra et av de to lagrene med biorest var det perioder med utslipp av lystgass, mens vi i det andre bare registrerte utslipp etter tilførsel av et urea/olje produkt. I biorestlageret der vi fant lystgassutslipp ser utslippene av lystgass ut til å komme etter at det har blitt tilført fersk husdyrgjødsel.

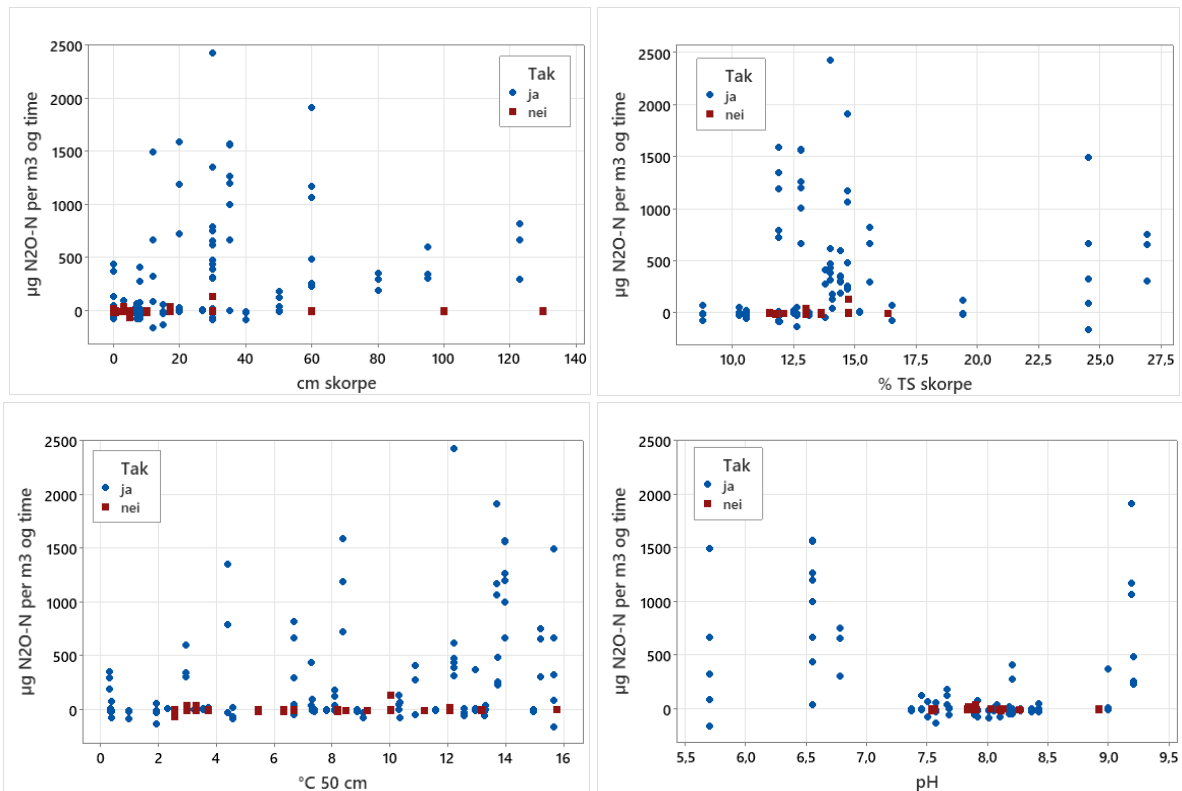


Figur 9. Utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$) per time og m^3 gjødsel omregnet til 6 % tørrstoff fra ulike gjødsellagre for bløtgjødsel. Grafen til venstre viser median (strek), gjennomsnitt (svart prikk) og 25 og 75 % kvartiler. Grafen til høyre viser gjennomsnitt. Loddrett linje indikerer 95 % konfidensintervall. Prøvene er forsøkt tatt innenfor samme uke når vi har tatt prøver på ulike gårder, men det har variert litt (se 2.2.1 og figur x). På gård 7 tok vi bare prøver ut 2022 og på gård 8 ble de fleste prøvene tatt i 2024. Antall uttak for registreringer av lystgass for hver gård er oppgitt i tabell 3.

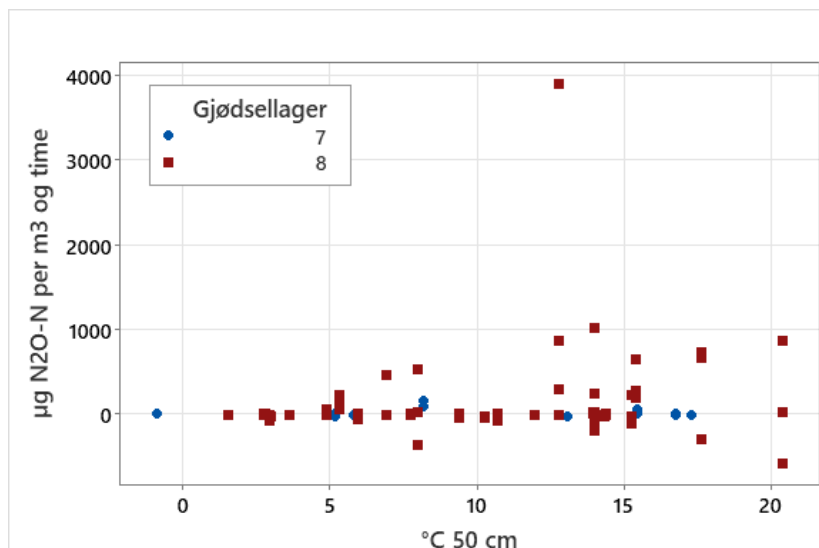
I en regresjonsanalyse med registreringer av lystgassutslipp når det var 10 cm skorpe eller mer fant vi at lystgassutslippene økte med både skorpetykkelse ($p=0,001$) og temperatur i gjødsla ($p<0,001$), mens den sank med tørrstoffprosent i skorpa ($p<0,05$), se figur 10. Det var også høyere lystgassutslipp på de tre gjødsellagene med tak, hvor det samtidig var skorpe, enn på de to lagene uten tak (nr. 3 og 4). Vi registrerte de største utslippene der det var 15-20 cm skorpe og ikke der skorpa var tjukkest (Figur 4). Lystgassutslippene sammenfalt med perioder med varm gjødsel. Vi fikk et overaskende negativt utslag av TS % i skorpa i regresjonsberegningen. Det skyldes nok at vi manglet tørrstoffprøver fra tynn og fuktig skorpe. Det var høye lystgassutslipp både ved pH under 7 og ved pH over 9 (Figur 11).



Figur 10. Utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$) per time og m^3 gjødsel omregnet til gjødselvolum med 6 % tørrstoff fra gjødsellagre med skorpe og tak (lager 1, 2 og 5), versus skorpetykkelse (cm skorpe) og tørrstoffprosent i skorpa (% TS skorpe) og temperatur i gjødsla ($^\circ\text{C } 50 \text{ cm}$). Fordi det er vanskelig å ta skorpeprøver når skorpa er under 10 cm, er ikke tørrstoffprosent bestemt i disse prøvene. Gjødsellager er forklart i figur 9.



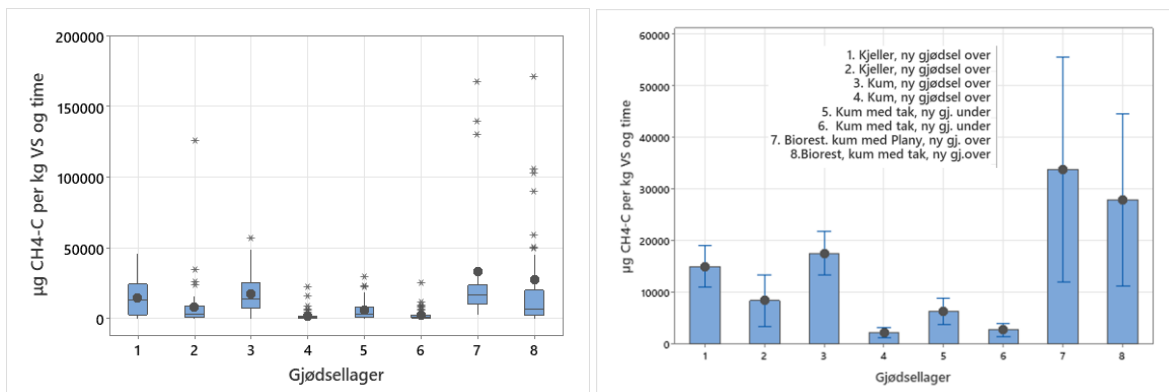
Figur 11. Utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$) per time og m^3 gjødsel omregnet til gjødselvolum med 6 % tørrstoff fra gjødsellagre med skorpe (lager 1,2,4 og 5) med og uten tak, versus skorpetykkelse (cm skorpe), tørrstoffprosent i skorpa (% TS skorpe), temperatur i gjødsla ($^{\circ}\text{C}$ 50 cm) og pH i gjødsla. Fordi det er vanskelig å ta skorpeprøver når skorpa er under 10 cm, er ikke tørrstoffprosent bestemt i disse prøvene. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak i figur 2. Gjødsellager med tak er enten en gjødselkjeller eller er kum med PVC-tak. Det er fire gjødsellagre med tak og et uten. Gjødsellager er forklart i figur 9.



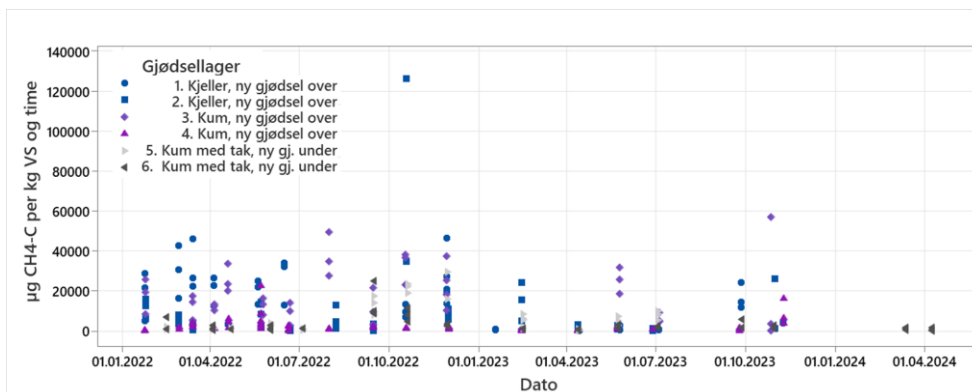
Figur 12. Utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$) per time og m^3 gjødsel omregnet til gjødselvolum med 6 % tørrstoff fra to gjødsellagre med biorest. Hvert punkt representerer et uttak. Forklaring av uttak figur 8 og gjødsellager figur 9.

3.3.2 Metan

Det var store variasjoner i utslipp av metan mellom gjødsellager (Figur 13 og Tabell 5) og gjennom året (Figur 14 og 16). Det var lave utslipp av metan der det var tykk og porøs skorpe. Der skorpa var 40 cm eller høyere var det små utslipp av metan registrert som $\mu\text{g CH}_4\text{-C}$ per kg organisk stoff (VS) og time (Fig. 15). Der vi observerte de tykkeste skorpene var det også mest gjødsel på lager og vi fant at utslippene av metan per kg organisk stoff sank med stigende mengde gjødsel på gjødsellageret (kg organisk stoff per m^2 gjødseloverflate $p < 0,001$) og cm skorpe ($p < 0,01$). I gjødsellager 4 og 6 var metanutslippene mye lavere enn for gjennomsnittet av gjødsellagre (Figur 13, 14, 15 og Tabell 5). I gjødsellager 6 var det ikke skorpe, men bobler, og med ett unntak (16.09.2022) små metanutslipp (Figur 14 og Vedlegg 9.1.3). Dette unntaket sammenfalt med tilførsel av mye gjødsel fra et ungdyrfjøs i forkant. pH gav varierende utslag i gjødsellagre med ubehandlet gjødsel, med det var lavest metanutslipp når pH var lavere enn 7 og høyere enn 9 (Figur 15).



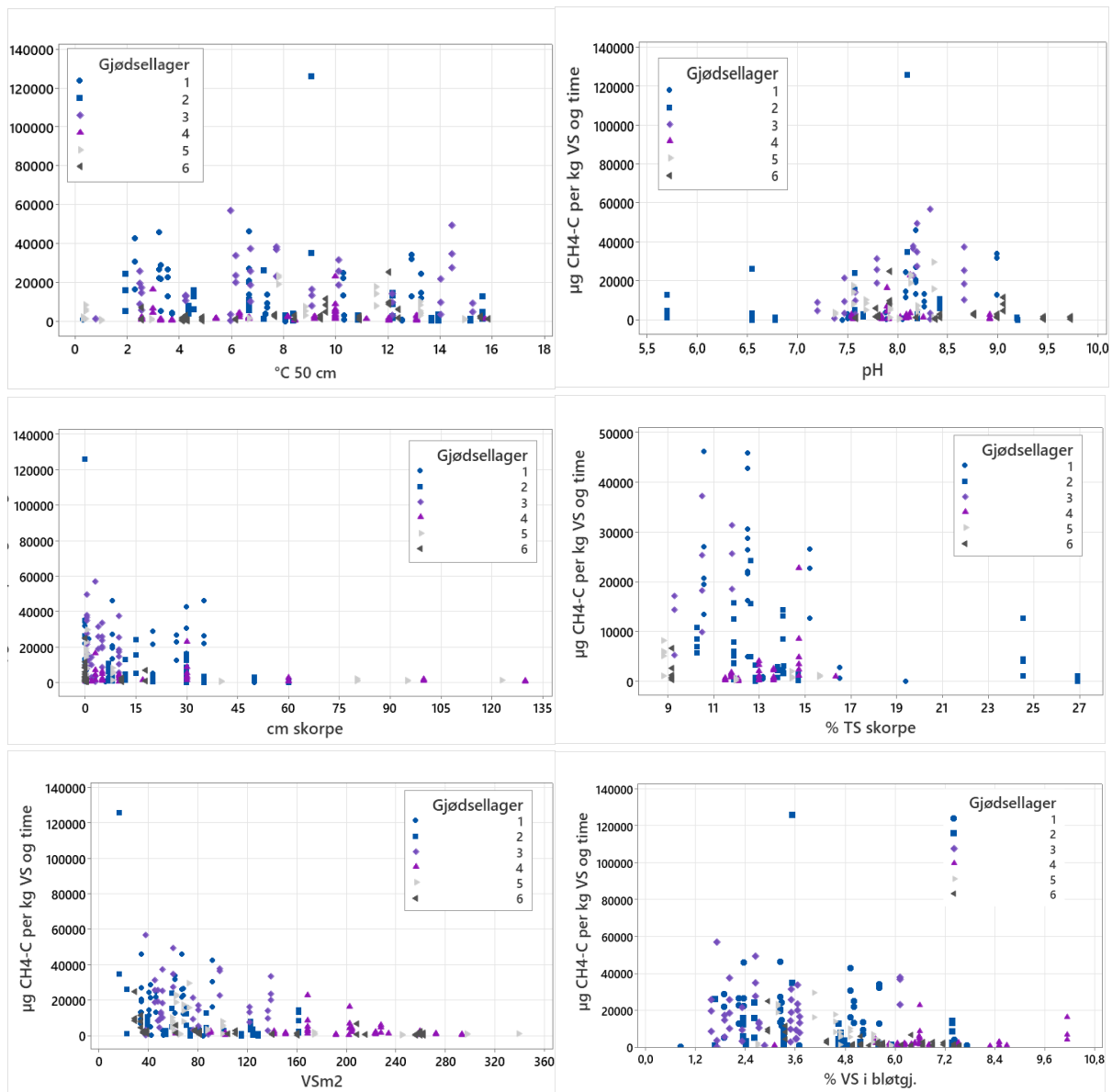
Figur 13. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per time og kg organisk stoff i gjødsla (VS) fra ulike gjødsellagre. Grafen til venstre viser median (strek), gjennomsnitt (svart prikk) og 25 og 75 % kvartiler. To høye verdier for gjødsellager 8 mellom 300 000 og 500 000 vises ikke. Grafen til høyre viser gjennomsnitt. Loddrett linje indikerer 95 % konfidensintervall. Prøvene er forsøkt tatt innenfor samme uke på ulike gårder, men det har variert litt (se 2.2.1 og figur 14). På gård 7 tok vi bare prøver ut 2022 og på gård 8 ble de fleste prøvene tatt i 2024.



Figur 14. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre uten biorest versus dato. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se Figur 8.

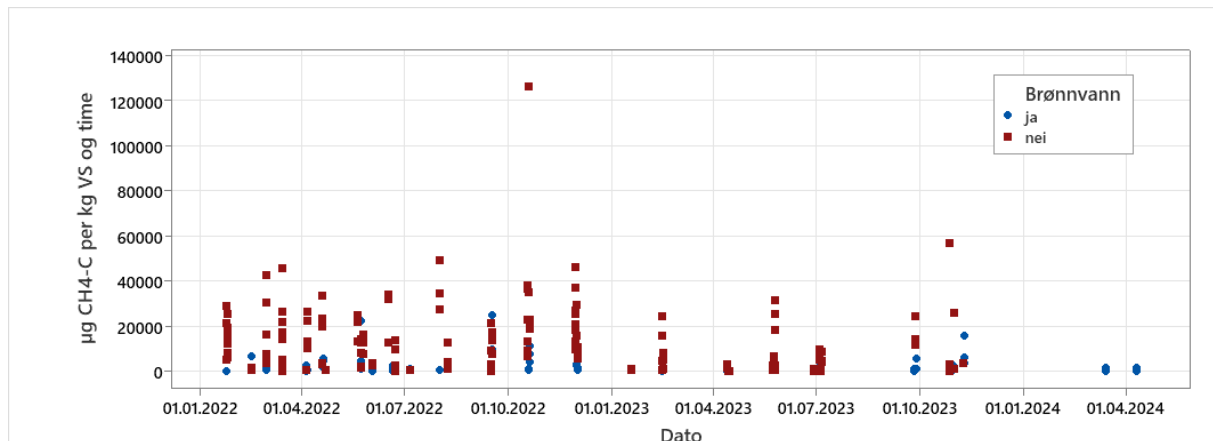
Tabell 4. Utslipp av metan (CH₄) registrert ved kammermetoden og oppgitt som µg CH₄-C per kg VS og time, mg CH₄-C per m³ gjødsel omregnet til 6 % tørrstoff og time, g CH₄-C per m³ gjødsel omregnet til gjødselvolum med 6 % tørrstoff og døgn og mg CH₄ per m³ gjødsel omregnet til 6 % tørrstoff og time for alle prøver og for hvert gjødsellager. Antall representerer antall uttak. Forklaring av uttak se Figur 8 og gjødsellager Figur 13. Resultane er oppgitt på ulike måter for lettere å kunne sammenligne med resultat i publisert litteratur. 7* viser til gjødsellager 7 uten utslippet registrert etter tilførsel av urea/olje-produkt.

Gass	Gjødsellager	Antall	Median	25 % kvartil	75 % kvartil	Mean	Min.	Maks.
µg CH ₄ -C per kg VS og time	Alle	380	4070	1038	14132	13524	1,5	487870
	1	45	13263	3035	24578	15008	2	46253
	2	54	3264	896	9173	8434	82	126049
	3	43	14470	7768	25635	17617	158	57004
	4	61	1119	597	2285	2233	75	22733
	5	37	3567	899	8250	6388	100	29450
	6	46	1191	734	2757	2793	56	25021
	7	21	16788	10493	24006	33821	3165	167661
	8	73	7260	2607	20312	27940	325	487870
mg CH ₄ -C per m ³ og time	Alle	380	146	42	525	446	0,1	11642
	1	45	514	109	943	598	0,1	1965
	2	54	143	36	379	335	3,6	4941
	3	43	508	240	909	621	5,7	2052
	4	61	46	25	95	94	3,1	938
	5	37	128	40	336	241	2,9	1152
	6	46	46	30	107	105	2,2	925
	7	21	608	385	908	1200	116	5818
	8	73	223	92	649	726	13,1	11642
g CH ₄ -C per m ³ og døgn	Alle	380	3,5	1,0	12,6	10,7	0,0	279
	1	45	12,3	2,6	22,6	14,3	0,0	47
	2	54	3,4	0,9	9,1	8,0	0,1	119
	3	43	12,2	5,8	21,8	14,9	0,1	49
	4	61	1,1	0,6	2,3	2,2	0,1	23
	5	37	3,1	1,0	8,1	5,8	0,1	28
	6	46	1,1	0,7	2,6	2,5	0,1	22
	7	21	14,6	9,2	21,8	28,8	2,8	140
	8	73	5,3	2,2	15,6	17,4	0,3	279
mg CH ₄ per m ³ og time	Alle	380	195	55	699	594	0	15523
	1	45	685	146	1257	797	0,1	2621
	2	54	191	48	505	447	4,9	6588
	3	43	677	321	1213	828	7,6	2736
	4	61	61	34	127	125	4,1	1251
	5	37	171	53	447	321	3,9	1535
	6	46	62	40	143	140	2,9	1233
	7	21	811	513	1211	1600	155	7757
	7*	18	725	449	1002	741	155	1557
8	73	297	123	865	968	17,5	15523	

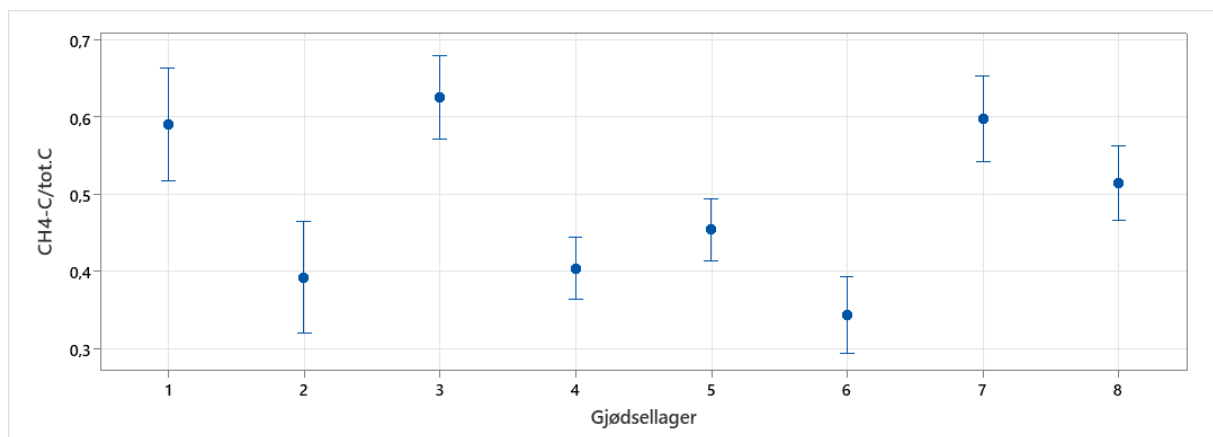


Figur 15. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre uten biorest ved stigende temperatur i 50 cm dyp i gjødsla, pH i bløtgjødsel, tykkelse og tørrstoffprosent i skorpa, kg organisk stoff per m^2 gjødseloverflate (VSm^2) og prosent organisk materiale i bløtgjødsel (%VS i bløtgjødsel). Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Grafen med % TS i skorpe mangler mange uttak fordi det mangler skorpeprøver der det var lite eller ingen skorpe. Her er det også en annen skala på Y-aksen da registreringene med høyest metanutslipp ikke er med. Forklaring av uttak se figur 8, gjødsellager se figur 13.

Det viste seg at de tre gjødsellagene med lavest metanutslipp hadde brukt eller brukte vann fra en dyp brønn (borevann) i fjøset. Den ene tilsatte finmalt, flytende kalk en gang i året (lager 6), mens lager 4 og 5 hadde høyt kalkinnhold i vannet (Figur 16 og Vedlegg). Forholdet $\text{CH}_4\text{-C}$ /totalt-C var lavere på lager 2, 4, 5 og 6 enn gjennomsnittet, mens det på lager 1 og 3 var høyt (Figur 17).

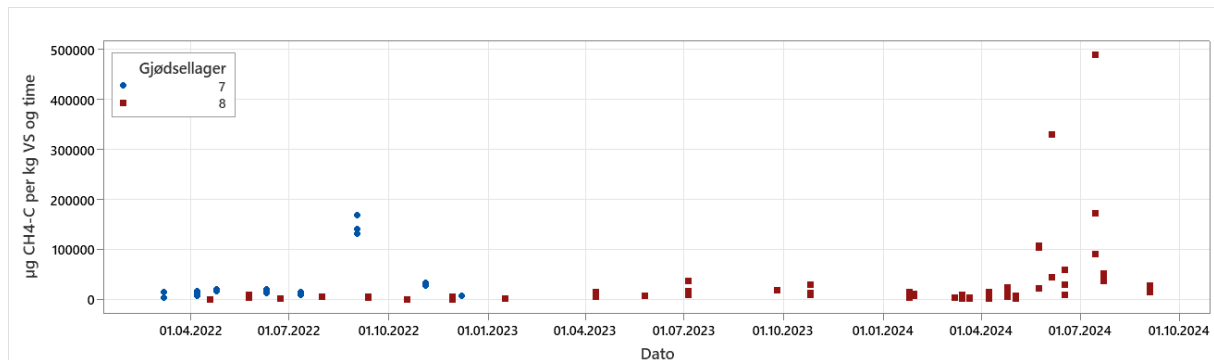


Figur 16. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre uten biorest ved ulike tidspunkt. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Brønnvann står for kombinasjonen av vann fra dyp borebrønn og kalk, enten tilsatt som svært finmalt flytende kalk (lager 6) eller fordi vannet har et svært høyt kalkinnhold (lager 4). Forklaring av uttak se Figur 8.

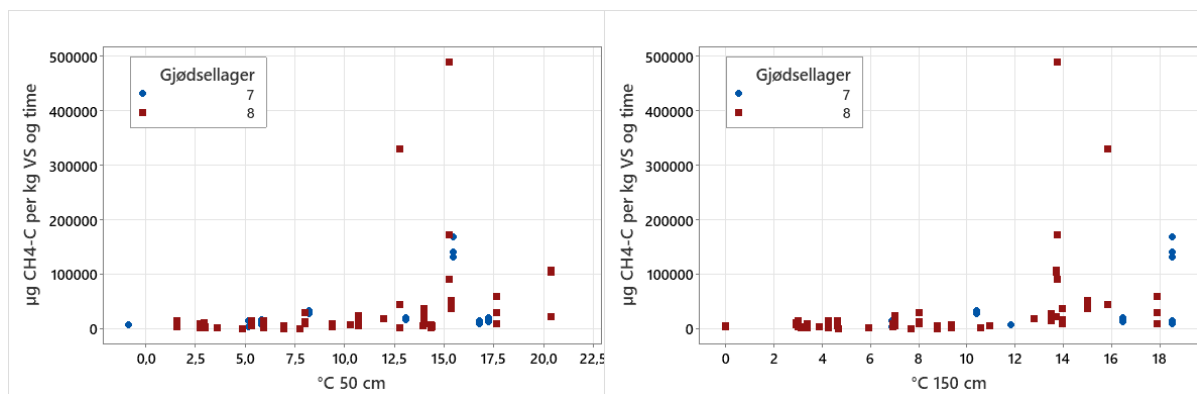


Figur 17. Gjennomsnittlig forhold mellom metanutslipp og totalt karbonutslipp [$\text{mgCH}_4\text{-C}/(\text{mgCO}_2\text{-C} + \text{mg CH}_4\text{-C})$] fra ulike gjødsellagre. Loddrett linje indikerer 95 % konfidensintervall.

For gjødsellagrene for biorest (7 og 8) var det ikke signifikant utslag for temperatur eller pH, antakelig fordi tilførsel av urea/olje-produkt eller ubehandlet gjødsel i lager for biorest så ut til å bety mer. Utslippene fra gjødsellager 7 var stort sett små, unntatt 2.09.22 (Figur 18 og vedlegg 9.1.4). Disse registreringene ble gjort kort tid etter at det ble tilsatt et avfallsprodukt fra fiskeindustrien som inneholdt urea og fiskeolje. For gjødsellager 8 ble de høyeste utslippene registrert sommeren 2024 da det ble tilført en del ubehandlet bløtgjødsel til lageret for biorest på et tidspunkt med ganske høy temperatur (Figur 19 og vedlegg 9.1.4).



Figur 18. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre med biorest (lager 7 og 8) på ulike tidspunkt. Hvert punkt representerer ett uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se figur 2 og gjødsellager se figur 13.



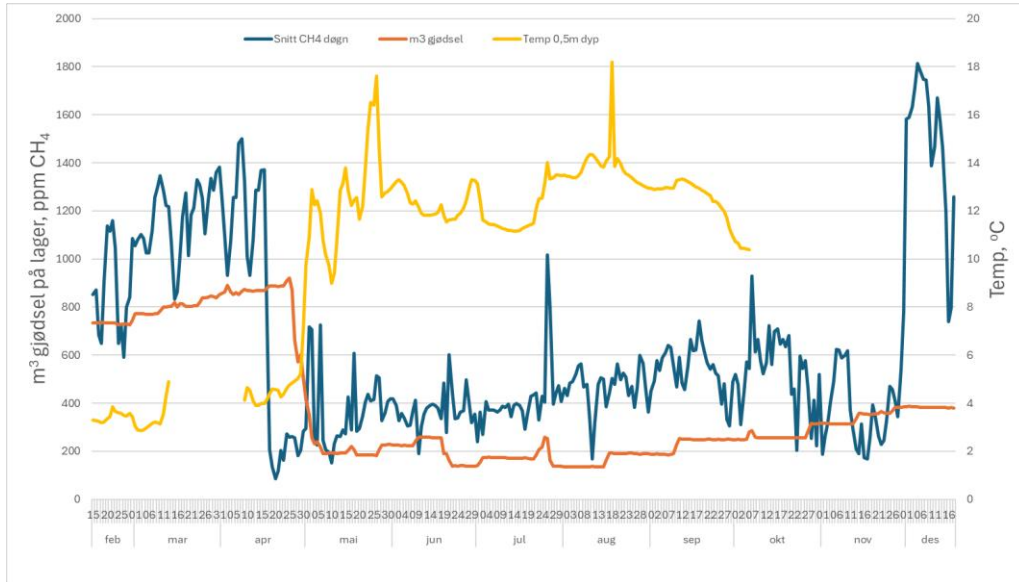
Figur 19. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre med biorest (lager 7 og 8) ved stigende temperatur i 50 og 150 cm dyp i gjødsla. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se figur 8 og gjødsellager se figur 13.

3.3.2.1 Metansensor

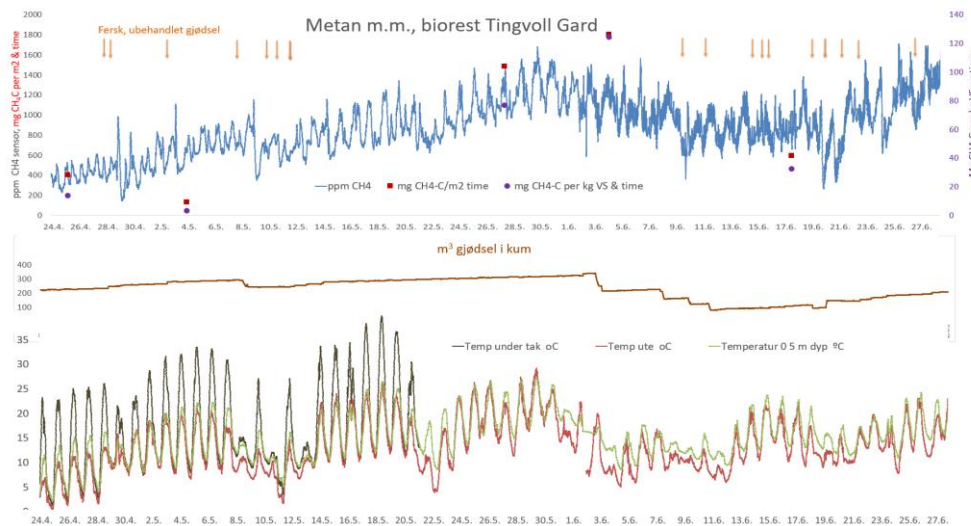
Både i gjødsellager 6 og gjødsellager 8 (biorestlager på Tingvoll gard) ser metansensorene ut til å gi realistiske registreringer av metankonsentrasjon i lufta over gjødsellageret. To av de tre metansensorene vi plasserte over gjødsla i gjødsellager 6 har vært stabile og vist nesten like verdier. Den tredje sensoren var ustabil. I gjødsellager 8 var hele systemet mer ustabil, sannsynligvis fordi vi koblet mange registreringer til samme enhet. Det ser ikke ut til at avstanden mellom sensorene har betydd noe for resultatet. Det vil si at registrert konsentrasjon av metan var omtrent på samme nivå i sensoren som hang lengst ned mot gjødseloverflaten som i de som hang 50 eller 100 cm høyere. Vi ser at metankonsentrasjonen over lufta i begge gjødsellagrene øker ved tilførsel av ny gjødsel og er lavere når det er lite gjødsel på lager selv om temperaturen stiger. I gjødsellager 8 ble det større utslippstopper når det ble tilført fersk, ubehandlet gjødsel. Toppene i metankonsentrasjon i månedsskifte april/mai på gjødsellager 6 kan skyldes omrøring og tilførsel av finmalt, flytende kalk. Vi kjenner foreløpig ikke årsaken til høy topp i desember.

Temperatursvingninger i lufta over gjødsellageret så vel som i gjødsla påvirket også avlest metankonsentrasjon. Det ser ut som det er et godt sammenfall mellom variasjoner i

metankonsentrasjon og utslipp av metan registrert med kammermetoden i gjødsellager 8. Kortvarige svingninger i avlest metankonsentrasjon ved forandringer i lufttemperaturen skyldes mest sannsynlig temperaturfølsomhet i sensoren.



Figur 20. Registreringer av konsentrasjon av metan fra 15. februar til 18. desember 2024 registrert med metansensor over gjødseloverflata (ppm CH₄) i gjødsellager 6. Mørkeblå linje er gjennomsnitt av to metansensorer. Rød linje er m³ gjødsel i kummen og gul linje er temperatur i °C 50 cm ned i gjødsla. Der det ikke er registrert temperatur, var temperaturloggeren ute av drift.



Figur 21. Registreringer på Tingvoll gard (lager 8) av konsentrasjon av metan ved metansensor over gjødseloverflata (ppm CH₄) sett i sammenheng med utslipphastighet registrert ved kammermetoden (mg CH₄-C per m² og time og mg CH₄-C per kg VS og time) vist som symboler i samme graf. De oransje pilene indikerer tidspunkt da det ble tilført ubehandlet bløtgjødsel direkte fra fjøset på grunn av driftsproblemer med biogassanlegget. Den brune grafen viser mengde gjødsel i kummen. I den nederste grafen viser den svarte linja temperaturen rett under duken i gjødsellageret. Dette var nær metansensoren. Temperaturloggeren sluttet å virke mot slutten av mai og vises derfor bare i første del av perioden. Den røde linja er temperatur ute, og den grønne er temperatur ved 50 cm dyp i gjødsellageret.

4 Diskusjon eget arbeid

4.1 Metodiske utfordringer

For å få innblikk i hva som skjer ute i praksis er det helt nødvendig å gjøre registreringer på gårder som er i drift. Våre registreringer viser imidlertid at det er vanskelig å gruppere gårdene etter type gjødsellager da variasjonen innenfor hver type er større enn mellom dem. Det gjelder for bestemmelse av temperatur i gjødsla (Figur 3) og for utslipp av lystgass (Figur 9) og metan (Figur 13).

Faktorer som vi ikke har med i oppsettet vårt, men som påvirker temperatur i et gjødsellager er blant annet hvor lenge gjødsla er på lager utover sommeren, hvor hyppig det tilføres ny gjødsel, farge på tak over kum, hvor mye vann som tilføres ved vasking og varmen på vannet og hvor dypt gjødselkum eller kjeller er nedgravd. Vi har også hatt utfordringer med perioder hvor en eller begge temperatursensorer i et gjødsellager sluttet å virke. Det er langt mellom gårdene og det har noen ganger tatt tid å få byttet ut ødelagte sensorer. På noen gårder har vi hatt en kortere måleperiode fordi det har skjedd forandringer på gården. Det har ført til at periodene hvor vi har målt temperatur har blitt ulik gjennom året for gårdene og antall dager hvor vi har registrert temperatur har variert for de ulike typene gjødsellager. Totalt har dette ført til at det har vært vanskelig å fange opp eventuelle effekter av type gjødsellager på temperaturen.

Temperatur varierer også i et gjødsellager, både i ulike dybde og i ulike steder i lageret. Dette har vi ikke hatt mulighet til å følge opp i denne undersøkelsen. Også pH varierer i et lager og synker med dybden i lageret. Det skyldes mest tap av CO₂ (Dalby m.fl. 2021). Temperatur og pH som vi registrerte i våre gjødsellagre er dermed ikke nødvendigvis representative for stedene i lageret hvor de ulike prosessene som påvirker gassutslipp skjer.

Fordi vi registrerer utslipp av både lystgass og metan tilsvarende utslipp fra en kubikk gjødsel omregnet til gjødselvolum med 6 % tørrstoff, og utslipp av metan per kg organisk stoff (VS) i gjødsla, betyr kvaliteten på gjødselprøvene mye. Der det ikke var skorpe, er prøvene ganske representative da vi tok prøver fra 4 ulike dyp i gjødsellageret og blandet sammen, før mengde tørrstoff og organisk stoff ble bestemt. Der det var skorpe, var det mer krevende. Ofte varierte tørrstoffinnholdet mye ned gjennom skorpa og det kan være en glidende overgang mellom skorpe og flytende gjødsel.

På grunn av metodiske utfordringer med uttak av gassprøver der det er skorpe (se 2.2.3.1) og fordi tykkelse og struktur på skorpe over bløtgjødsel varierer mye gjennom året og mellom ulike bløtgjødsellagre, gir det samlet sett stor måleusikkerhet. Kammermetoden gjør det heller ikke mulig å registrere metanutslipp når gjødsla røres om, og gassen som har ligget lagret i gjødsla, frigjøres.

Utprøvinger av boks med og uten kappe indikerte at når skorpa var tykk, uregelmessig og ganske tørr i overflaten registrerte vi høyere gassutslipp når vi brukte kammer med kappe enn når vi brukte kammer uten kappe, men det var ikke alltid slik. Noen ganger, selv med ganske tørr og tykk skorpe,

fant vi at klimagassutslippene ble høyere med kammer som vi skar inn i skorpa enn der vi hadde kammer med kappe som fløt oppå skorpa. Der det var tynn skorpe fant vi alltid høyere utslipp med kammer uten kappe. Noen steder var det også ujevn skorpe, slik at det var uregelmessig, lite eller ingen skorpe der ny gjødsel ble tilført og tykkere skorpe lenger unna. Plassering av kammer betydde derfor mye for hvor mye gass som ble samlet opp. Et eksempel på det er prøver som ble tatt 27. oktober på gård nr. 3. På de to første uttakene av gassprøver beregnet vi metan-utslipp på henholdsvis 6 og 124 g CH₄-C per m² og time, mens i det siste var det mye høyere gassutslipp, beregnet til 2 160 g CH₄-C per m² og time. Der kammeret ble plassert siste gang var det sprekker i skorpa som det boblet gass gjennom.

Når det var tørr skorpe og vind i lager uten tak var det veldig krevende å få en god oppsamling av gassen, noe som gjorde det vanskelig å estimere utslippshastighet. Det virket som om vinden tømte kammeret, noe vi registrerte som negative CO₂-utslipp. Når det ble registrert negative utslipp av CO₂, ble heller ikke registreringene av N₂O og CH₄ med i beregninger og figurer.

Vi fant også at det var krevende å bestemme utslippshastigheten når konsentrasjonen av metan og CO₂ over gjødsla allerede var høy. Den første gassprøven fikk da ofte en forhøyet konsentrasjon. Dette var størst problem der det var en tett kjeller med lite lufting slik at frigjort metangass og karbondioksid samlet seg i luften over gjødsellageret.

Fordi metanutslipp består av en kontinuerlig diffusjon og mer periodiske utslipp med bobler vil metanutslipp fra et gjødsellager variere mye gjennom et døgn (VanderZaag m.fl. 2010). VanderZaag m.fl. (2010) fant topper som varte 1-2 timer og hadde 5-10 ganger høyere utslipp enn resten av døgnet. Som illustrert i figur 20 varierer konsentrasjonen av metan over gjødsellageret mye også i våre undersøkelser, både gjennom døgnet og mellom ulike dager. Når vi tar gassprøver med en måneds mellomrom eller sjeldnere, blir det stor usikkerhet i registreringer av metanutslipp.

To faktorer kan ha bidratt til at vi generelt har høyere estimat på utslipp av metan enn om vi kunne registrere gassfluks uten å bruke kammer. På grunn av undertrykk som vi lagde i kammeret ved å suge luft inn i sprøyta kan vi ha fått en økt frigjøring av gass fra gjødsla. På grunn av at vi valgte de tidspunktene i regresjonsberegningen for utslipp av gass som hadde høyest korrelasjonskoeffisient og det nesten alltid sammenfalt med de høyeste estimatene for metan vil dette også kunne bidra til noe forhøyede verdier.

Metansensorene gir kontinuerlig måling, men er foreløpig i en tidlig fase. En utfordring er å få sensorene stabile og kunne fungere med batteri. I vårt nye prosjekt «Overvåking av metanutslipp fra lager for bløtgjødsel og bioest (Metansensor) 2024-2026, Agros 245694» jobbes det videre med å utvikle slike sensorer. Metankonsentrasjon sammen med andre registreringer skal brukes til å estimere hastigheten på utslipp av metan.

4.2 Våre funn

4.2.1 Temperatur

Gjennomsnittlig temperatur i gjødsellagrene i undersøkelsen er på 8,4 °C. Det er ganske likt temperaturen som Rodhe m.fl. (2009) registrerte i et gjødsellager nær Uppsala (8,4°C), lavere enn i et gjødsellager i Sørvest-Sverige (9,7 °C), men høyere enn målinger gjort nord i Sverige (5,6 °C). Den store variasjonen i gjødseltemperatur mellom gårdene som vi registrerte viser imidlertid at også andre faktorer enn breddegrad og lagertype påvirker gjødseltemperaturen. Perioder med høyere temperatur i restlageret på de to gårdene med biorest viser hvor viktig det er å ha et effektivt kjølesteg som reduserer temperaturen før bioresten slippes ut i lageret. Begge anleggene har kjølesteg, men nedkjøling av bioresten kan forbedres.

4.2.2 Klimagasser

I tråd med våre tidligere undersøkelser (Ebbesvik m.fl. 2021) og andre undersøkelser (f.eks. Meng m.fl. 2023), fant vi at metan var den dominerende klimagassen fra bløtgjødsellager. Vi bekrefter produksjon av lystgass i porøskorpe som tidligere beskrevet av blant annet Sommer m.fl. (2000) og Rodhe m.fl. (2012). Der det var våt eller ufullstendig skorpe, var det omtrent ikke utslipp av lystgass. Dette samsvarer med andre undersøkelser (Petersen 2018, Rodhe m.fl. 2018, Sommer m. fl. 2000, Wood m.fl. 2012).

Gjødsellager 2 og gjødsellager 5 hadde betydelig skorpe, samtidig som tak beskyttet mot regn. Det var derfor ofte tørr og porøs skorpe her. Det var i disse to gjødsellagrene vi fant de høyeste utslippene av lystgass fra ubehandlet gjødsel (Tabell 3). Men selv i disse gjødsellagrene var det gjennomsnittlige utslippet av metan 60 ganger (Gjødsellager 2) og 225 ganger (gjødsellager 5) så stort som utslippet av lystgass omregnet til CO₂-ekvivalenter. Ut fra våre undersøkelser er utslipp av lystgass fra gjødsellagere med tørr skorpe et lite problem, og bør ikke brukes som begrunnelse for å hindre skorpedanning som jo er viktig for å redusere ammoniakutslipp (Misselbrook m.fl. 2005) og sannsynligvis metan-utslipp (Sommer m.fl. 2000, Petersen m.fl. 2005). Utslipp av lystgass fra lager for biorest på Tingvoll gard (gjødsellager 8) skyldes antakelig at det har blitt tilført fersk gjødsel til biorestlageret. Det er flere årsaker til at gjødsel har blitt tilført direkte til biorestlageret. Anlegget har vært i en oppstartsfasen og har vært brukt til andre forsøk. I tillegg har man i perioden jobbet med å få kontroll på/unngå opphopning av gjødsel i gjødselsystemet i fjøset (flyterenne).

4.2.2.1 Metan

Våre utslipp av metan (Tabell 5) var betydelig høyere enn utslippene som ble registrert av Rodhe m.fl. (2009) og Rodhe m.fl. (2015) i deres forsøkskummer i Sverige per m³ gjødsel og døgn. De fant at utslipp om sommeren varierte fra 0,025 til 0,065 g CH₄-C per m³ og døgn, avhengig av blant annet mengde gjødsel i kummen. Kummen med høyest utslipp i deres undersøkelse hadde nesten 20

ganger lavere metanutslipp enn medianverdiene på gjødsellagrene med lavest utslipp i vår undersøkelse (1,1 g CH₄-C per m³ og døgn, Tabell 5). Metanutslipp beregnet med en dansk modell basert på Rodhes resultater (Rodhe m.fl. 2009) lå imidlertid i samme størrelsesorden som våre gjennomsnittverdier (Rodhe m.fl. 2012). En årsak til forskjell mellom våre resultater og de fra Rodhe m.fl. (2009, 2015) kan muligens skyldes at det er mindre vann og dermed høyere konsentrasjon av organisk materiale i gjødsla som er brukt i forsøkskummene enn det som er vanlig på norske gårder og i våre undersøkelser. Ved nedbryting av organisk materiale vil konsentrasjonen av stoffer som er giftige for metanogene organismer bli mye større når det er lite vann i gjødsla (Dalby m.fl. 2021). I gjødselkummene til Rodhe m.fl. (2009) var tørrstoffinnholdet rundt 8 % og VS på over 6 %. Det var bare ett gjødsellager som hadde en VS over 6 % i våre undersøkelser (Gjødsellager 4, Figur 5) og der var det lave metanutslipp (Figur 13). Det kan også hende at vi har noe for høye verdier på grunn av undertrykk i våre kammer og skorsteineffekt (se 2.2.3.1 og 4.1). Vi ser at våre resultater er i samme størrelsesorden som resultatene gjengitt av Vechi m.fl. (2023) (Figur 21). Dette understøtter at vi kan anta at resultatene våre er ganske realistiske til tross for store metodiske utfordringer (4.1). Det store antallet prøver vi har tatt gjennom hele prosjektperioden har antakelig jevnet ut noe av usikkerheten ved kammermetoden.

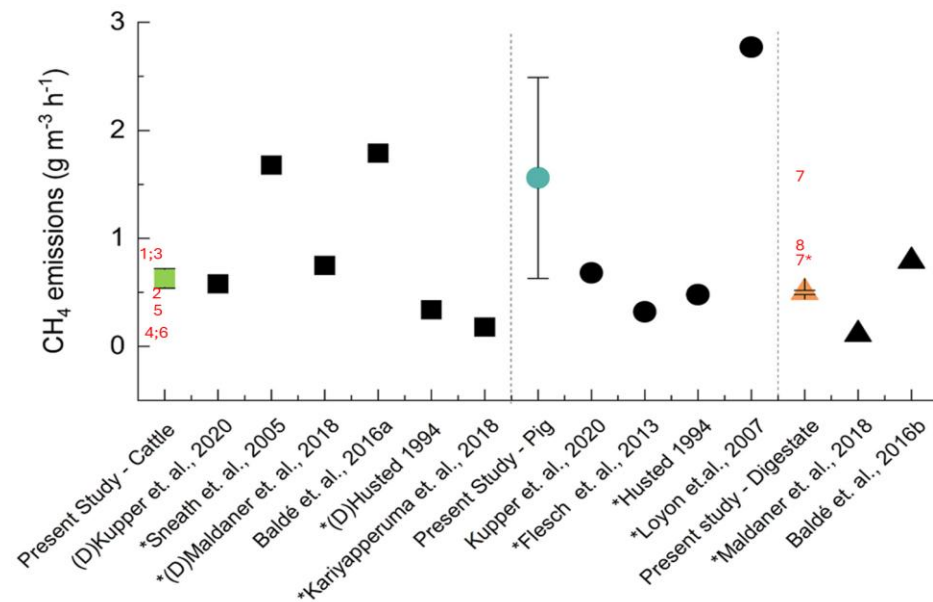
Mange undersøkelser viser at utslipp av metan og lystgass stiger med stigende temperatur (Sommer m.fl. 2007; Cárdenas m.fl. 2021; Armbrøse m.fl. 2023; Vechi 2023). Nedbryting av organisk materiale, og ulike enzymatiske prosesser går raskere og gasstrykket er høyere når temperaturen stiger. Vi fant imidlertid ikke noen tydelig effekt av temperatur i vår studie. Dette skyldes nok at mange andre faktorer varierer og at temperatur i gjødsla sjelden var over 15 °C, og bare unntaksvis oppe i 20 °C. Sommer (2007) fant små metanutslipp under 15 °C.

Vi fant lavere utslipp fra gjødsellagrene 4 og 6 enn de fleste resultat gjengitt av Vechi m.fl. (2023), mens utslippene fra de to lagrene med biorest var noe høyere. I lagrene med biorest var det stort sett lave utslipp (Figur 18, 19 og 20), men enkelte episoder hvor det var høy temperatur i restlageret samtidig med en ekstern tilførsel førte til høye utslipp. For lager 7 med biorest var det tilsetning av urea med fiskeoljerester som førte til høye utslipp. Fordi det er et avfallsprodukt, varierer innholdet en del og vi vet ikke eksakt hva som ble tilført før de høye utslippene ble registrert. Det er sannsynlig at det er nedbryting av oljen fra tørrfraksjonen (15-20 % olje) som har gitt høyere metanutslipp. En kunne forvente økte utslipp av lystgass med økt innhold av lett tilgjengelig nitrogen i gjødsla. Vi fant en tendens til dette da vi tok gassprøver en knapp måned etter at vi registrerte høyt utslipp av metan (vedlegg 10.1.3). Sannsynligvis er det så sterke reduserende forhold at eventuell N₂O vil bli omdannet til N₂. De høye metanutslippene og registrert H₂S i lufta over gjødsla (1 ppm) tyder på det. Det var også høy pH i denne bioresten (8,5 til 9) og det ble registrert ammoniakkutslipp med GA5000 ved den aktuelle målingen. Lufta over biorestlageret inneholdt 5-7 ppm NH₃.

Ved det høyest registrerte utslippet i gjødsellager 8 ble det tilført store mengder ubehandlet gjødsel etter en opprensning i fjøs og ulike gjødselkanaler. Dette sammenfalt med forholdsvis høy

temperatur i gjødsel (Figur 19). Dette illustrerer hvor viktig det er å unngå tilførsel av fersk gjødsel i biorest, og hvor viktig det er å holde lav temperatur ved langtidslagring av biorest. Til tross for god utråtningsgrad i reaktoren og lavt innhold av organisk materiale i bioresten, inneholder den fortsatt aktive mikroorganismer. En metanpopulasjon som sultes, som på et biorestlager, og forsynes med substrat, som jo fersk gjødsel er, vil kunne danne utslippstopper (Dalby m.fl. 2021).

Mikroorganismene går i dvale dersom bioresten kjøles ned. Ved lenger oppholdstid i reaktoren vil mer av karbonet brytes ned. Begge tiltak vil redusere tap av klimagasser fra biorestlager. Vi har beregnet våre utslipp ut fra enten kg VS som er i gjødsel eller per m³ gjødsel på lager tilsvarende et gjødselvolum med 6 % tørrstoff. Fordi vi ikke har tatt hensyn til hvor mye organisk materiale som er brutt ned gjennom biogassprosessen og fanget opp som biogass, fører det til en overestimering av metanutslipp i gjødsel fra ei ku etter biogassbehandling sammenlignet med ubehandlet gjødsel. Maldaner m.fl. (2018) fant at fra samme kubesetning var utslippene av CH₄ per kg VS nesten bare 1/3 i bioresten i forhold til i ubehandlet gjødsel. De forklarte dette med at det organiske materialet i bioresten var mindre fordøyelig enn i ubehandlet gjødsel. De fant imidlertid også at utslippene fra biorest økte raskere ved temperaturøkning enn i ubehandlet gjødsel. Selv når det bare var biorest på lageret fant vi ikke lavere utslipp per kg VS ved biorest enn i ubehandlet bløtgjødsel. Høyere følsomhet for temperatur og høyere temperatur i bioresten (3.1) enn i den ubehandlede gjødsel kan være en viktig forklaring her.

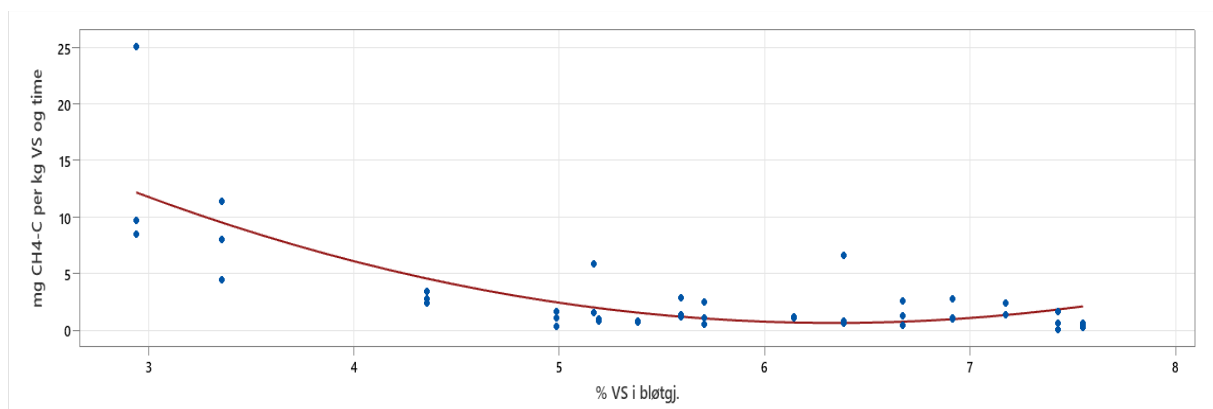


Figur 22. Denne grafen er hentet fra Vechi m.fl. (2023) og viser metanutslipp oppgitt som g CH₄ per m³ og time. Firkanter representerer kugjødsel, sirkler grisegjødsel og trekkanter biorest. Røde tall er nummer på gjødsellager i SkitGass. De er plassert omtrentlig for å vise størrelsen på utslippene i våre registreringer sammenlignet med andre sine funn. 7* viser til gjødsellager 7 uten utslippet registrert etter tilførsel av urea/olje-produkt. Utslippene i SkitGass er oppgitt i tabell 5.

Lavere metanutslipp fra gjødsellager med skorpe enn uten kan skyldes at det ligger metan under skorpa som vi ikke får registrert med våre kammermålinger. Svenske forsøk fant 40-140 ganger høyere konsentrasjon av metan over gjødseloverflaten rett etter omrøring enn før (Rodhe m.fl. 2008). Lave utslipp kan også skyldes oksidasjon av metan når metan passerer gjennom ei porøs skorpe (Sommer m.fl. 2000; Petersen m.fl. 2005), eller det kan skyldes begge deler. Fordi vi fant lystgassutslipp i perioder med tykk skorpe fra gjødsellager 2, tyder det på at aerob metanoksidasjon kan være en del av forklaringen til lavere utslipp per kg organisk stoff fra gjødsellager 2 enn fra gjødsellager 1. Det er de samme porøse forholdene i skorpa som trengs for oksidasjon av NH_3 til N_2O som for CH_4 til CO_2 . Lavere forhold $\text{CH}_4\text{-C}/\text{totalt-C}$ i gjødsellager 2 enn 1 (Figur 17) støtter denne antakelsen da en oksidasjon av metan til CO_2 vil senke dette forholdet. Vi fant også tykkere og mer langvarig skorpe i lager 2 enn i lager 1 (vedlegg 8.1.1). I fersk gjødsel og ved lav temperatur dannes det også mer CO_2 enn CH_4 mens andelen CH_4 øker ved lagret gjødsel og ved høyere temperatur (Dalby m.fl. 2021). Gjødsellager 1 tømmes oftere enn gjødsellager 2 og det er omtrent samme gjødselhøyde i de to lagrene, så ferskere gjødsel i 1 enn i 2 er neppe årsaken her. Det var også omtrent samme temperatur i gjødsla (Vedlegg 9.1.1).

I gjødsellager 5 var det sterk skorpedannelse på etterjuls vinter og tidlig vår. Også her fant vi utslipp av lystgass, og et ganske lavt forhold mellom $\text{CH}_4\text{-C}/\text{totalt-C}$. Fordi forholdet $\text{CH}_4\text{-C}/\text{totalt-C}$ også var lavt når det ikke var skorpe, kan ikke aerob oksidasjon av metan være den eneste årsaken til dette. Lavt $\text{CH}_4\text{-C}/\text{totalt-C}$ forhold fant vi også i gjødsellagrene 4 og 6 (Figur 17). Til tross for tjukk skorpe i gjødsellager 4 registrerte vi bare små lystgassutslipp (Figur 9) og det var ofte våt skorpe på grunn av regn. Vi spekulerte derfor på om det kunne være noe annet som forårsaket lave metanutslipp fra gjødsellagrene 4, 6 og muligens 5. I gjødsellager 6 ble det tilsatt flytende, finmalt kalk hver vår, men det ble det også gjort i gjødsellager 3, hvor vi fant mye høyere utslipp. Vi mistenkte at vannet som disse tre gårdene brukte kan ha påvirket metandanning i bløtgjødsla. To av gårdene (4 & 5) bruker daglig brønnvann fra en dyp borebrønn. Dette vannet inneholder blant annet mye kalk og jern. Gården knyttet til gjødsellager 6 har brukt tilsvarende brønnvann, men ikke lenger til daglig. I en undersøkelse av bakteriesammensetningen i gjødsla i gjødsellager 6 (Rittl m.fl. 2025, under skiving desember 2024) fant vi både anaerobe organismer som produserer metan (metanogene arkebakterier: Methanosarcinales; Methanomicrobiales) og sulfatreduserende bakterier som oksiderer metan under anaerobe forhold (Syntrophobacterales; Desulfobacterales; Desulfobacteriales). Arkene kan også bidra til metanoksidasjon i et samspill med anaerob metanoksidasjon forårsaket av sulfatreduserende metanotrofe bakterier hvor sulfat reduseres samtidig som metan oksideres til CO_2 . Dersom hovedårsaken til lave metanutslipp skyldes anaerob metanoksidasjon via sulfatreduserende bakterier skulle vi imidlertid registrert utslipp av H_2S som observert av Eriksen m.fl. (2012) etter tilsetning av K_2SO_4 eller metionin. Det gjorde vi ikke, sannsynligvis på grunn av at det var lite svovel i gjødsla. Noe H_2S kan også ha vært løst i gjødsla og høy pH kan også ha påvirket registrering av H_2S da den dissosierer og blir i løst i væske som HS^- og S^{2-} ved høy pH, og bare en liten andel finnes som H_2S ved pH over 8 (Tchobanoglous m.fl. 2003).

Det er imidlertid mange komponenter i et bløtgjødsellager som kan hemme metanogene mikroorganismer som langkjedede fettsyrer, flyktige fettsyrer (VFAs), H₂, NH₄-N, høy pH og H₂S (Dalby m.fl. 2021). Fordi det dannes mange toksiske substanser når organisk materiale brytes ned, antar Dalby m.fl. (2021) at metandannelsen kan avta med økende innhold av organisk materiale på gjødsellageret. Vi fant en slik trend i vårt materiale (Figur 22), tydeligst for gjødsellager 6. I en lineær regresjonsanalyse (R²=52) fant vi at både stigende pH (p<0.05) og % VS (p<0.001) i bløtgjødsel reduserte utslipp av metan fra dette gjødsellageret. Det kan være et samspill med den finmalte kalken og stor konsentrasjon av organisk materiale i denne gjødsla. Vi kjenner ikke til tilsvarende undersøkelser med finmalt kalk, men lesket kalk Ca(OH)₂ er funnet å øke nedbryting av organisk materiale i gjødsellager (Orlando & Borja 2020). Den finmalte, flytende kalken som ble brukt inneholder ca 96 % kalsiumkarbonat og 0,6 % dolomitt. Resten er ulike bergarter, blant annet en del sjiktgittermineral (Rittl. M.fl. 2025). Sjiktgittermineraller har vist seg å katalysere nedbryting av organisk materiale tidlig i nedbrytingsfasen (Kunc og Stotzky 1974) og sannsynligvis også kunne bidra til å opprettholde et inokulum av bakterier. Vi kan derfor ikke utelukke at også tilskuddet av sjiktgittermineral kan ha påvirket prosessen i gjødsellageret. I dette gjødsellageret var det tak og lageret får stadig tilførsel av fersk gjødsel nedenfra uten at gjødsla røres om. Det var mye bobler i denne gjødsla, noe som tyder på stor mikrobiell aktivitet. Gjødsellager 3, hvor det også ble tilsatt finmalt, flytende kalk, er en åpen kum som mottar mye regnvann og det er en mye lavere konsentrasjon av organisk materiale i denne gjødselkummen. Det kan også ha påvirket nedbryting av organisk materiale at gjødsellager 3 ble tømt forholdsvis ofte og at ny gjødsel ble tilført ovenfra.



Figur 23. Utslipp av metan (mg CH₄-C) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellager 6 ved ulikt innhold av organisk materiale (% VS) for gjødsellager 6. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se Figur 8.

Fordi det brukes brønnvann i fjøset med høyt innhold av kalk i gjødsellager 4 og 5 kan det være noe av de samme mekanismene som skjer her. Gjødsellager 5 har også tak og får ny gjødsel nedenfra, men her tilsettes det ikke kalk. Gjødsellager 4 er et åpent lager, men det var høy konsentrasjon av organisk materiale da gårdbruker jevnlig sugde ut den mest flytende væska og overførte den til et annet lager. Dersom det kan stadfestes i andre undersøkelser at lite vann i gjødsla, i samspill med

kalk, er nok til å redusere utslippene av metan fra husdyrgjødsel betydelig, kan dette få stor betydning for reduserte utslipp fra bløtgjødsellager. Det en enkel og miljøvennlig måte som også kan brukes i økologisk landbruk. Det må undersøkes mer hvordan dette kan gjøres i praksis. Tjukk gjødsel kan være tung å røre om og for å få god infiltrasjon i eng er det viktig med tynn gjødsel ved spredning av gjødsla. Dersom gjødsla ikke blir lettflytende og uten skorpe som i gård 6, må det derfor tilsettes vann i forbindelse med spredning.

Det er viktig å understreke at variasjonen i registrerte metanutslipp fra disse gjødsellagrene ikke er noe gårdbrukeren bevisst har kunnet påvirke da ingen på forhand var klar over sammenhengene vi har funnet her. Variasjonen er derfor relatert til valg som gårdbrukeren har gjort ut fra andre hensyn. Vi var heldige og oppdaget at sammenfall av flere faktorer reduserte utslipp.

4.3 Åpne arbeidsmøte

4.3.1 Fjøsømte

NORSØK og NLR arrangerte et fjøsømte om husdyrgjødsel på Tingvoll gard 1. oktober 2024 hvor vi inviterte gårdbrukere i prosjektet, medlemmer i NLR i Midt-Norge og andre interesserte. Det var 35 personer til stede, blant annet en agronomklasse fra Gjermundnes videregående skule. I fjøsømte orienterte vi om resultat fra prosjektet SkitGass, muligheter for reduserte klimagassutslipp ved produksjon av biogass og lagertiltak for bedre utnytting av næringa i gjødsla. I samarbeid med et annet prosjekt ble det demonstrert og diskutert separering av bløtgjødsel og kompostering av den faste delen.

4.3.2 Møte og Webinar

I samarbeid med Landbruksdirektoratet arrangerte NORSØK et åpent hybridmøte om klimagassutslipp fra bløtgjødsel 15. oktober 2024. Det var 18 personer til stede i møterommet til Landbruksdirektoratet og 22 deltok på TEAMS. Representanter fra Landbruks og matdepartementet, Miljødirektoratet, Landbruksdirektoratet, NIBIO, Carbon Limits, NLR, Norges Bondelag, Norsk Bonde- og småbrukarlag, prosjektmedarbeidere i SkitGass og forskere fra Sverige og Danmark deltok i møtet.

Av innleggene og diskusjonen i møtet kom det tydelig fram at selv om temperatur har stor betydning for utslipp av metan og andre klimagasser, blir utslippene også påvirket av andre faktorer slik at det spesielt ved lave temperaturer ikke er noen tydelig sammenheng mellom temperatur og utslipp. Av tiltak som ble nevnt som har betydning for dannelse av metan og lystgass er hvor lenge gjødsla blir liggende i varmt fjøsrom før den pumpes ut i kaldere gjødsellager; hvor mye gjødsel det er igjen i lager som et inokulum når ny gjødsel tilsettes; kvaliteten på organisk materiale, inkludert andel lett tilgjengelig karbon; tykkelse og porøsitet av skorpe.

Fordi det er mange faktorer som påvirker utslipp av metan og lystgass er det krevende å lage en god modell som beskriver de faktiske utslippene av metan. I Norge beregnes metanutslipp etter IPCC Tier 2 (Metanmodellen). Den baseres på data over antall dyr og anslag på hvor mye organisk materiale (VS) som lagres som bløtgjødsel og hvor mye som biorest, anslag på gjennomsnittlig årstemperatur i ulike regioner i Norge, den relative andelen av husdyrgjødsel i hver region og hvor ofte gjødsel blir tatt ut av lageret. Usikkerheten i B_0 (Maksimal metanproduksjonskapasitet) og MCF (metankonverteringsfaktor) og andre faktorer ble diskutert på møtet. Det kreves en grundig dokumentasjon for å gjøre forandringer i metanutslippsmodellen.

Fullstendig tømning av husdyrgjødsellager, lav temperatur i lager av bløtgjødsel og biorest, unngå blanding av biorest og fersk gjødsel på lager, tilsetning av lav dose svovelsyre og bruk av plasmateknologi var tiltak som ble nevnt for å redusere metanutslipp fra lager. Det var ellers stor enighet om at det trengs mer forskning for å dokumentere aktuelle utslipp og finne de beste tiltakene for reduserte metanutslipp.



Bilde 15. Stort engasjement i Landbruksdirektoratets møterom den 15. oktober 2024. Hvordan dokumentere og redusere utslipp av klimagasser fra gjødsellager. Foto: S. Rivedal, NIBIO

5 Anbefalte tiltak i Danmark og Sverige for reduserte klimagassutslipp fra gjødsellagre.

5.1 Danmark

I Danmark gis det hvert år ut en virkemiddelkatalog til reduksjon av klimagasser i landbruket. Det er en idekatalog med gjennomgang av virkemidler og anslått reduksjon i klimagassutslipp i forhold til referansesituasjonen. Virkemiddelkatalogen 2024 Danmark (KVIK 24):

<https://pure.au.dk/portal/da/publications/virkemidler-til-reduktion-af-klimagasser-i-landbruget-2024>

Modell og beregninger av metanautslipp fra husdyrgjødsel i Danmark finnes her:

<https://github.com/AU-BCE-EE/Dalby-2024-KVIK>

Teksten nedenfor er for det meste hentet fra Anders P.S. Adamsen sitt innlegg på Webinar om bløtgjødsel 15. oktober 2024 og er basert på anbefalinger i KVIK 24. Utdyping av de ulike punktene finnes i KVIK 24.

Biogassanlegg

- Kort lagringstid før behandling i biogassanlegg
- Effekten av biogassanlegg avhenger av oppholdstid i fjøs og forlager og utråningstid i biogassanlegg
- Bioest returneres til lagertanker for bioest
- Gasstett dekke av bioestlager med oppsamling av gass

De regner med at utråning i biogassanlegg reduserer utslipp fra bløtgjødsel fra storfe med 0,3 kg metan per tonn bløtgjødsel.

Gjennomsnittlig utslippsfaktor (CH_4 -utslipp/ CH_4 produsert) på 69 danske biogassanlegg ble bestemt til 2,5 % av produsert metan (Fredenslund m.fl. 2023). De konkluderte at måling av totale metanutslipp, lekkasjer og punkt-utslipp er viktig for å redusere metanutslipp. De fant at 6 biogassanlegg reduserte utslippene med 46 % ved relativt enkle tiltak.

Forsuring med svovelsyre

I Danmark anbefales tilsetning av mindre mengder svovelsyre (2 kg per tonn gylle). Når det tilsettes ny gjødsel, må det tilsettes ny syre og gjødsla må blandes godt. De regner at slik forsuring av bløtgjødsel reduserer utslipp fra bløtgjødsel fra storfe med 2,3-0,7 kg metan per tonn bløtgjødsel.

Antatte mekanismer er:

- metanogene organismer hemmes ved lav pH
- sulfatreduserende organismer utkonkurrerer metanogene organismer
- H_2S hemmer vekst av mikro-organismene

Oppsamling og fakling av gass

- Gjødsl lagres gasstett
- Gass fra gjødsellager suges ut og brennes i en fakkel

Ventilert flytelag på bløtgjødsel

Porøst flytelag oppå gjødsl med tilførsel av oksygen kan gi ca. 40% reduksjon av metanutslipp. De har funnet at et porøst flytelag på bløtgjødsel kan redusere utslipp fra bløtgjødsel fra storfe med 2,3-1,4 kg metan per tonn bløtgjødsel.

5.2 Sverige

I Sverige er det gitt ut en rekke rapporter med anbefalinger av tiltak som reduserer utslipp av klimagasser fra husdyrgjødsel.

- JTI-rapport nr 337: Täckt ytmyllning av flytgodsl i vall –teknikutveckling, ammoniakavgång, växthusgaser och avkastning
- JTI-rapport nr 370: Växthusgasemissioner från lager med nötflytgodsl
- JTI-rapport nr 402: Växthusgaser från stallgodsl -Litteraturgenomgång och modellberäkningar
- JTI-rapport nr 413: Växthusgaser från rötad och örötad nötflytgodsl vid lagring och efter spridning
- JTI-rapport 427: Kontrollerad trumkompostering med liten klimatpåverkan
- RISE-rapport 2018:18: Åtgärder för att minimera växthusgasutsläpp från lager med rötad och örötad godsl
- RISE-rapport 2019:51: Ammonia emissions from storage: non-digested and digested cattle slurry, with and without acid.

Lena Rodhe sammenfattet undersøkelser gjort av Berglund & Mjöfors (2023) på tiltak for å senke temperaturen i gjødsellager og emisjonsberegninger av metan på Webinar 15. oktober 2024 (Fritt oversatt av S. Hansen):

- Skygge har ingen tydelig effekt på temperaturen i hele gjødsellageret, men kan påvirke overflaten.
- Et dypt lager med liten overflate gir mindre utslipp enn et grunt lager med stor overflate.
- Tak er et bra tiltak for å redusere ammoniakutslipp, men ikke for å redusere metanutslipp. Tak kan forsinke oppvarmingen om våren og avkjølingen om høsten. Har en flere gjødsellagre kan det være en fordel å vente med spredning av gjødsl fra lager som har tak til slutt om våren for å ha nytte av nedkjøling fra vinteren så lenge som mulig.
- Gjødselstrategien har framfor alt betydning for utslipp av metan. Ha lite gjødsl på lager om sommeren.

Lena Rodhe sammenfattede generelle anbefalinger om tiltak for å redusere utslipp av klimagasser fra gjødsellagre for storfe under svenske forhold, slik (Fritt oversatt av S.Hansen):

- Lagre gjødsel svalt om sommeren. Daglig utpumping fra fjøs til lager. Ha dype lagre. Lite gjødsel på lager om sommeren.
- Valg av dekke på bløtgjødsel har betydning. Vær obs på at lystgass kan dannes i porøse dekke.
- Dekke til hauger med fastgjødsel minsker effektivt utslipp av lystgass
- Biorest fra biogassanlegg kan gi store metanutslipp ved lagring over sommeren. Lang behandlingstid i reaktoren minsker tapene fra lager. Oppsamling av gass er det beste alternativet for å hindre metantap.
- Surgjøring av gjødsel minsker både metan- og ammoniakkutslipp.
- Se hele kjeden under ett, slik at for eksempel tiltak for å redusere metanutslipp ikke fører til økte lystgassutslipp eller økt energibehov.

Sammanfattning LAGRING stallgödsel

- Lagra gödsel svalt. Daglig utgödsling från stall. Djupa lager. Lite gödsel i lager under sommar.
- Val av täckningsmaterial för flytgödsel har betydelse. (Lustgas!)
- Täckning av fastgödselhögar med plastduk minskar effektivt lustgasutsläpp.
- Rötad gödsel kan ge stora metanutsläpp under sommarlagring. Lång rötningstid minskar förlusterna i lager. Uppsamling av gas bästa alternativ.
- Surgörning av gödseln minskar både metan- och ammoniakemissioner.
- Se hela kedjan, så att t.ex. inte metanreducerande åtgärder medför förhöjda utsläpp av lustgas eller ökad energiförbrukning.

6 Tiltak og anbefalinger for reduserte klimagassutslipp fra lager for bløtgjødsel fra storfe

På bakgrunn av resultater fra undersøkelsene i dette prosjektet, kunnskap fra Sverige og Danmark og faglitteratur fra ulike forskere, har vi sammenstilt en liste med anbefalinger for å redusere klimagassutslipp fra bløtgjødsellagre.

6.1 Generelle anbefalinger

Lav temperatur i gjødsellageret vil redusere utslipp av metan (CH_4), lystgass (N_2O) og ammoniakk (NH_3). Tiltak som kan senke temperaturen:

- Ha minst mulig gjødsel på lager om sommeren
- Ved nybygging graves gjødselkjellere og gjødsellager så langt ned som praktisk mulig
- Plasser utendørs gjødsellager så skyggefullt som mulig
- Unngå mørkt dekke over gjødsel enten det er tak eller flytende dekke, bruk så lyse farger som mulig. Dette for å unngå at gjødsellageret varmes mer opp enn det ville gjort uten tak eller dekke
- Effektiv nedkjøling av biorest før den slippes ut i lager for biorest
- Kort oppholdstid for gjødsel i varmt fjøs
- Unngå at varmt vaskevann fra fjøset slippes rett ut i lagertank
- Der varmen kan utnyttes om sommeren kan det monteres en varmeveksler som henter varme fra gjødsellager

Tak over gjødsellager og tilførsel av ny gjødsel nedenfra vil føre til at det danner seg en porøs skorpe på storfegjødsel. En slik skorpe vil redusere fordamping av ammoniakk og fremme oksidering av metan til CO_2 slik at også utslippene av metan blir mindre. Det skjer samtidig en oksidering av ammoniakk til lystgass, men utslippene av lystgass øker så lite at effekten av reduserte metanutslipp er mye større når vi regner dette om til CO_2 -ekvivalenter.

Surgjøring av gjødsel med svovelsyre (H_2SO_4) anbefales av danske og svenske forskere for å redusere ammoniakkfordamping ved spredning og utslipp av ammoniakk og metan fra gjødsellagre. I Danmark anbefales nå en lavdose med 2 kg syre per tonn gjødsel. På grunn av fare for lystgassutslipp ved tilsetning av salpetersyre (HNO_3) anbefales bruk av svovelsyre. Det må tilføres ny syre ved lang lagringstid og tilførsel av ny gjødsel på grunn av gjødsel sine bufferegenskaper (Andersen m.fl. 2024).

Det er ikke tillatt å bruke svovelsyre i økologisk landbruk. Det er usikkert hvor mye svovelsyren tærer på betong og det anbefales å unngå direkte kontakt med betongen.

Tett lager og oppsamling av gass er en måte å hindre utslipp fra både lagre for ubehandlet gjødsel og biorest dersom gassen enten føres sammen med øvrig gass fra gården og utnyttes direkte eller behandles. I Danmark har de utviklet en metode til å fikle gassen (Andersen m.fl. 2024). Ved å brenne gassen omdannes metan til CO₂.

Biogass. Ved utråtning av gjødsel i et biogassanlegg brytes mye av det organiske materialet ned, og spesielt lett omsettelige karbonforbindelser som stivelse og cellulose blir omdannet til biogass og fjernet fra bioresten. Utslipp av metan fra gjødsellagre kan dermed bli redusert både ved at det er mindre organisk materiale i biorest og ved at det organiske materialet som finnes er mindre potent. Biogassbehandling er dermed en måte å redusere metanutslipp fra storfegjødsel på. Det kreves imidlertid stor kunnskap om prosessene og egenskapene til bioresten for å unngå uønskede metanutslipp fra biogassanlegget og biorest. I bioresten er det mange sultne mikroorganismer som fortsatt vil kunne produsere metan dersom de får tilført næring. Tiltak som reduserer faren for uønskede klimagassutslipp fra biogassanlegg og biorest:

- Gjennomgang av biogassanlegg for å sjekke farer for lekkasjer og andre kilder til uønskede utslipp
- Lang oppholdstid i reaktoren for å redusere innhold av potent organisk materiale
- Effektiv nedkjøling av biorest før den slippes ut i lager for biorest
- Ha bare biorest i lageret og unngå tilførsel av ubehandlet husdyrgjødsel, urea/olje-produkt og annet energirikt organisk materiale
- Tett dekke på biorestlager og oppsamling av gass, spesielt ved lagring av biorest ved større anlegg

6.2 Mulige tiltak som trenger utprøving før de anbefales

Redusere vanntilførsel for dermed å hindre uttyning av det organiske materiale (VS) i gjødsla. Ved nedbryting av det organiske materialet i ubehandlet bløtgjødsel dannes det stoffer som hemmer metanogene organismer (se 4.2.2.1). Dette kan føre til redusert metanproduksjon (Dalby m.fl. 2021), noe våre resultater også indikerer. Det trengs flere undersøkelser for å stadfeste dette, og også hvilke organismer som er involvert. Dersom videre undersøkelser kan bekrefte at en høy konsentrasjon av organisk materiale i bløtgjødsel reduserer metanutslipp, trengs det utprøving av tiltak som på en rimelig og effektiv måte kan redusere vanninnhold i gjødsla på gjødsellagre. Samtidig er det ønskelig med et høyt vanninnhold ved spredning på eng for å sikre god sprekvalitet og god gjødseleffekt. Tiltak for høyere konsentrasjon av VS kan for eksempel være:

- Tak over gjødselkum for å unngå nedbør
- Unngå tilførsel av vaskevann fra fjøset til gjødsellager
- Ved lagdeling, sug ut deler av den lettflytende gjødsla tidlig om våren og spre den på engskifter som er egnet til tidlig gjødsling.

Tilsetning av finmalt, flytende kalk eller bruk kalkrikt vann i fjøset ved gjødsellager med høy konsentrasjon av VS. Kalk kan øke nedbryting av organisk materiale og dermed øke frigjøring av stoffer som hemmer metanogene organismer. Våre resultat tyder på at kalktilsetning kan ha betydning nettopp der det er en høy konsentrasjon av VS i gjødsla. Det kreves flere undersøkelser for å finne ut av mekanismene her.

Separering av bløtgjødsel reduserer innholdet av VS i bløtgjødsel, og kan dermed redusere mengden substrat for metanogene organismer (VanderZaag m.fl. 2018). Det fører også til en lettflytende del som lett infiltreres ved spredning på eng. Ved kompostering av den faste delen av separert biorest fra storfegjødsel og separert ubehandlet bløtgjødsel fant Eggen m.fl. (2024) at det ble små utslipp av metan fra den faste delen. Et porøst kompostmateriale med god lufttilgang er en viktig forklaring her, men de fant også at avvannet fast biorest har lavere restgasspotensiale enn biorest før separering. Det kan bety at den mer lett nedbrytbare delen av det organiske materialet har blitt igjen i den flytende delen og kan føre til økte metanutslipp der.

Tilførsel av luft nedenfra i gjødselrenne eller gjødsellager vil kunne hemme metanogene organismer da de er strikt anaerobe og oksygen er giftig for dem. Men resultatet er avhengig av metodikken for tilføring av luft, hastigheten og temperaturen i gjødsellageret (Ambrose m.fl. 2023). Lufttilførsel øker nedbryting av organisk materiale og gjør gjødsla lett å spre. Det er imidlertid viktig å undersøke effekt på utslipp av lystgass og ammoniakk da tilførsel av luft til bløtgjødsel kan øke utslipp av disse (Ambrose m.fl. 2023).

Forsuring av gjødsel med svakere, organiske syrer. Det er gjort undersøkelser med ulike organiske syrer som er tillatt i økologisk landbruk, som for eksempel melkesyre, men det har ikke vært like effektivt som svovelsyre til å senke pH, og det har gitt mye skum (Ambrose m.fl. 2023).

Tilsetning av sukker eller andre produkt som bidrar til melkesyregjæring. Dette har gitt gode resultat i lab-forsøk (Ambrose m.fl. 2023), men av økonomiske og andre årsaker er det sannsynligvis vanskeligere å bruke i gjødsellager.

7 Andre forskningsbehov

Kompleksiteten i et gjødsellager gjør at det ikke finnes en enkel modell som kan forutsi metanutslipp (Dalby m.fl. 2021). Det trengs kontinuerlig modellering og testing for å få til dette. Det er dessuten viktig å se hele kjeden i sammenheng for å unngå at sparte klimagassutslipp et sted i kjeden fører til økte utslipp et annet sted. Dersom det gjøres tiltak i fôringa for å redusere metanutslipp fra dyras fordøyelse må også konsekvenser for utslipp fra gjødsellager undersøkes. Ved tiltak i gjødsellager for å redusere metanutslipp må det undersøkes om det kan øke utslipp av lystgass etter spredning av gjødsla.

Det trengs rimeligere, mindre arbeidskrevende og mer nøyaktige metoder for å undersøke metanutslipp på norske gårdsbruk. Dette prosjektet og andre prosjekt har vist at det er store forskjeller i utslipp fra ulike gjødsellagre. For å kunne identifisere de beste tiltakene, er det viktig å kunne identifisere hvilke faktorer som best reduserer utslipp. Gjødsellagre på gårder skiller seg fra forsøkskummer både i størrelse, utforming og tilførsel av ny gjødsel, og gjødsellagre på gårdene skiller seg fra hverandre. Kammermetoden er kostbar, det er utfordrende å få tatt representative prøver der det er varierende grad av skorpe over gjødsla og det er ikke mulig å ta prøver når gjødsla røres om. Danske forskere fant ved måling av totale utslipp av metan på ni danske mellegårder ved tracer-metodikk (Vechi m.fl. 2022) at IPCC-metodikken som brukes i nasjonal rapportering til Kyoto-protokollen underestimerte utslippene med 35 %. De identifisere ikke hvor mye som kom fra lager, men undersøkelsen viser at det er usikkerhet i estimatene. Bruk av metansensorer som omtalt tidligere er interessante i denne sammenhengen for å få en automatisert måleteknologi. Tracermetoden hvor en bruker en gass til sporing av luftbevegelse kan være en måte å estimere utslipp fra hele gjødsellageret på.

Det er økt bruk av urea/olje-produkter fra fiskeindustri i landbruket som erstatning for kunstgjødsel. Det er positivt å utnytte avfallsprodukt som gjødsel, men samtidig må vi unngå at dette fører til økte klimagassutslipp. Våre undersøkelser viste høye utslipp av metan fra biogasslager som ble tilsatt urea/olje-produkt fra fiskeindustrien. En løsning for å redusere uønskede utslipp av metan fra biorestlager kan være å tilsette produktet rett før gjødsla spres, men vi vet ennå ikke nok om effekter av dette til å gå ut med en generell tilråding. Grundige undersøkelser bør gjøres for å optimalisere gjødseleffekten og minimalisere klimagassutslipp ved tilsetting av urea-produkter til gjødsel og biorest.

For å kunne kvantifisere klimagassutslipp fra bløtgjødsellager og kunne dokumentere effekt av ulike husdyrgjødselhandtering, trengs det bedre dokumentasjon av effekt av ulike typer skorpe på netto utslipp av lystgass og metan. Det er også behov for bedre estimat på andel lett nedbrytbare karbonforbindelser ved ulike lagertidspunkt og – forhold, og bedre modell for beregning av metanutslipp fra ulike punktkilder (Søren O. Petersen, Aarhus Universitet, innlegg på Webinar 15.

oktober 2024). Det trengs også bedre metoder for å dokumentere tiltak som gjøres for å redusere metanutslipp på gårdsnivå. Søren O. Petersen konkluderer slik (fritt oversatt av S. Hansen):

- Dagens metoder for rapportering av klimagassutslipp på nasjonalt nivå (IPCC) er ikke egnet til å beskrive gjødselhåndtering på gårdsnivå
- Aktivitetsdata i modellene gjenspeiler ikke faktiske årsaker til klimagassutslipp
- En modell med daglige trinn er nødvendig for å ta høyde for ulike handlinger og effekter av tiltak for reduserte klimagassutslipp
- Det er behov for eksperimentell validering av modellparametere, eller bruke proxyer som kan kvantifiseres for individuelle punktkilder
- Forbedret gjødselhåndtering kan i betydelig grad bidra til å redusere klimagassutslipp på husdyrbruk



Bilde 16. Vi har lært mye om klimagassutslipp fra bløtgjødsel, men fortsatt finnes det hemmeligheter der nede i dypet som kan hjelpe oss å lage gode modeller for utslipp og å redusere utslippene av klimagasser. Foto: NORSØK

8 Konklusjon

Metan er den viktigste kilden til klimagassutslipp fra lagre for bløtgjødsel fra storfe. Selv om utslipp av metan og lystgass øker med økt temperatur, er det andre faktorer som betyr mer for dannelse og frigjøring av disse gassene under praktiske forhold.

Temperatur

Det var lav temperatur i gjødsel i de gjødsellagene vi undersøkte med bare få dager over 15 °C selv om sommeren. Høyest var temperaturen i lagre for biorest.

Biorest

Utslipp av metan var ikke lavere i lagre for biorest enn i lagre for ubehandlet storfegjødsel. Tilsetning av fersk gjødsel eller annet energirikt materiale som urea/olje-produkt gir øking i metanutslipp fra lagre for biorest.

Vann og kalk

Bygningstype ser ikke ut til å bety mye for utslipp av metan, men vanninnholdet i gjødsel kan være en faktor som er undervurdert. Vi fant lavest utslipp av metan der det var høyest konsentrasjon av organisk materiale i gjødsel. Muligens er dette også en effekt av kalktilsetning og økt nedbryting av organisk materiale. Effekten av vann kan skyldes at nedbrytningsprodukt som er giftige for metanogene arker fortynnes i vann. Dette må undersøkes nærmere.

Skorpe

Skorpe på bløtgjødsel er kjent for å senke fordamping av ammoniakk. Våre undersøkelser bekrefter lavere utslipp av metan og høyere utslipp av lystgass der det er porøs skorpe, men lystgassutslippene vi målte var uansett små.

Metansensor

Det trengs bedre grunnlagsdata og modeller for vurdering av ulike tiltak for reduserte utslipp av klimagasser fra gjødsellager. Foreløpige registreringer tyder på at metansensorer som kontinuerlig overvåker konsentrasjonen i lufta over gjødsellager kan være en hjelp for å få til dette.

9 Referanser

- Aarnes, H. 2021. Metanotrofe bakterier. Store norske leksikon. https://snl.no/metanotrofe_bakterier
- Ambrose, H. W., Dalby, F. R., Feilberg, A., & Kofoed, M. V. W. 2023. Additives and methods for the mitigation of methane emission from stored liquid manure. *Biosystems Engineering*, 229, 209–245. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2023.03.015>
- Andersen, M.N. & Adamsen, A.P. 2024. Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport nr 227. Rådgiving.373 s. <https://pure.au.dk/portal/da/publications/virkemidler-til-reduktion-af-klimagasser-i-landbruget-2024>
- Berglund, M., & Mjöfors, K. 2023. *Temperatur i flytgödsellager, Mätningar och emissionsberäkningar. Rapport från Hushållningssällskapet Halland*, <https://hushallningssallsskapet.se/wp-content/uploads/2023/10/rapport-temperatur-20230511.pdf>
- Cárdenas, A., Ammon, C., Schumacher, B., Stinner, W., Herrmann, C., Schneider, M., Weinrich, S., Fischer, P., Amon, T., & Amon, B. 2021. Methane emissions from the storage of liquid dairy manure: Influences of season, temperature and storage duration. *Waste Management*, 121, 393–402. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.12.026>
- Dalby, F.R., Hafner, S.D., Petersen, S.O., Vanderzaag, A.C., Habtewold, J., Dunfield, K., Chantigny, M.H. & Sommer, S.G., 2021. Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20252>
- Denier van der Gon, H.A.C. & Neue, H.U. 1994. Impact of gypsum application on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochem. Cycles* 8, 127–134. <https://doi.org/10.1029/94GB00386>
- Ebbesvik, M, Kvande, I., Rodhe, L., Morken, J., Dörsch, P. & Hansen, S. 2021. Klimagassutslipp fra utendørslager for bløtgjødsel fra storfe. NORSØK Rapport vol 6, nr 9. <https://orgprints.org/id/eprint/39786/>
- Eggen, T., Bergersen, O., Bergheim, H., Bless, M., Cabell, J., Dietrich, M., Fongen, M., Frøseth, R.B., Hansen, S., Kvande, I., Pedersen, R., Solli, L og Øgaard, A.F. 2024. Klimanøytral kompostering av biorest for resirkulering av ressurser i konvensjonelt og økologisk landbruk. NIBIO Rapport vol 10, nr 115.
- Eriksen, J., Andersen, A. J., Poulsen, H. V., Adamsen, A. P. S., & Petersen, S. O. 2012. Sulfur Turnover and Emissions during Storage of Cattle Slurry: Effects of Acidification and Sulfur Addition. *Journal of Environmental Quality*, 41(5), 1633–1641. <https://doi.org/10.2134/JEQ2012.0012>
- Fredenslund, M.A., Gudmundsson, E., Maria Falk, J., & Scheutz, C. 2023. The Danish national effort to minimise methane emissions from biogas plants. *Waste Management*, 157, 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.035>
- Hansen, S., Bernard, M.E., Rochette, P., Whalen, J.K. & Dörsch, P. 2014. Nitrous oxide emissions from a fertile grassland in Western Norway following the application of inorganic and organic fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 98:71-85. DOI 10.1007/s10705-014-9597-x
- Hilgert, J. E., Amon, B., Amon, T., Belik, V., Dragoni, F., Ammon, C., Cárdenas, A., Petersen, S. O., & Herrmann, C., 2022. Methane Emissions from Livestock Slurry: Effects of Storage Temperature and Changes in Chemical Composition. *Sustainability (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/su14169934>
- Hindrichsen m. fl. 2006. Methane emission, nutrient degradation and nitrogen turnover in dairy cows and their slurry at different milk production scenarios with and without concentrate supplementation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113:150-161
- IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Editors: Eggleston S, Leandro Buendia L, Miwa K, Ngara T and Tanabe K. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management. Intergovernmental Panel on Climate Change. IGES, Japan. ISBN 4-88788-032-4.
- IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

- Kolle, S.O. & Oguz-Alper, M. 2020. Bruk av gjødselressurser i jordbruket 2018. Metodebeskrivelse og resultater fra en utvalgsbasert undersøkelse. Statistisk sentralbyrå. Rapporter 2020/9. 123 s. [Bruk av gjødselressurser i jordbruket 2018. Metodebeskrivelse og resultater fra en utvalgsbasert undersøkelse](#)
- Kunc, F. & Stotsky, G. 1974 Effect of clay minerals on heterotrophic microbial activity in soil. *Soil Sci.* 118, s.186-195
- 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258, 96–107. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.12.184>
- Meng, X., Sørensen, P., Møller, H. B., & Petersen, S. O. (2023). Greenhouse Gas Balances and Yield-Scaled Emissions for Storage and Field Application of Organic Fertilizers Derived from Cattle Manure. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 345, 108327. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4261512>
- Miljødirektoratet m.fl. 2019. Greenhouse Gas Emissions 1990-2017, National Inventory Report
- Miljødirektoratet 2020. Klimakur 2030 - Tiltak og virkemidler mot 2030. M-1625.
- Misselbrook, T. H., Brookman, K.E.S., Smit, K.E., Cumby, T., Williams, A.G & McCrory, D.F. 2005. Crusting of stored dairy slurry to abate ammonia emissions: Pilot-Scale Studies. *J. Environ. Qual.* 34, 411–419. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0411dup>
- Orlando, M.Q. & Borja, V.M. 2020. Pretreatment of animal manure biomass to improve biogas production: A review. *Energies* 13.
- Petersen, S.O., Amon, B. & Gattinger, A. 2005. Methane oxidation in slurry storage surface crusts. *J. Environ. Qual.* 34, 455–461. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.455>
- Petersen, S.O., Andersen, A.J. & Eriksen, J., 2012. Effects of Cattle Slurry Acidification on Ammonia and Methane Evolution during Storage. *J. Environ. Qual.* 41, 88–94. <https://doi.org/10.2134/JEQ2011.0184>
- Petersen, S.O., Blanchard, M., Chadwick, D., Del Prado, A., Edouard, N., Mosquera, J. & Sommer, S.G. 2013. Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal* 7, 266–282. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000736>
- Petersen, S.O. 2018. Greenhouse gas emissions from liquid dairy manure: Prediction and mitigation. *J. Dairy Sci.* 101, 6642–6654. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13301>.
- Regjeringen 2019. Intensjonsavtale mellom jordbruket og regjeringen om reduserte klimagassutslipp og økt opptak av karbon fra jordbruket for perioden 2021-2030. <https://www.regjeringen.no/contentassets/ada13c3d769a4c64a0784d0579c092f4/klimaavtale-i-jordbruket.pdf>
- Rittl, T. F., Hansen, S. & Meynet, P. m.fl. 2025. Effects of calcium carbonate products on methane production from cattle slurry (Cal-Me). NORSØK Rapport. Under skrivning
- Rodhe, L., Ascue, J., Tersmeden, T., Ringmar, A. & Nordberg, Å. 2008. Växthusgasemissioner från lager med nötflytgödsel. JTI-rapport. Lantbruk och Industri. Nr 370. 69 s. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:959494/FULLTEXT01.pdf>
- Rodhe, L., Ascue, J., & Nordberg, Å. 2009. Emissions of greenhouse gases (methane and nitrous oxide) from cattle slurry storage in Northern Europe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 8, 1–17. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/8/1/012019>
- Rodhe, L., Baky, A., Olsson, J., & Nordberg, Å. 2012. Växthusgaser från stallgödsel-Litteraturgenomgång och modellberäkningar. In *JTI-rapport 402, Lantbruk & Industri*. <https://doi.org/ISSN-1401-4963>
- Rodhe, L., Ascue, J., Willen, A., Persson, B. V., & Nordberg, Å. 2015. Greenhouse gas emissions from storage and field application of anaerobically digested and non-digested cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.004>
- Rodhe, L., Alverbeck, A., Ascue, J., Edström, M., Nordberg, Å., Pizzul, L. & Tersmeden, M. 2018. Åtgerder for å minimera växthusgasutslipp från lager med rötdad och örötdad gödsel. RISE Rapport, Uppsala, Sverige 2018:18. 52 s.

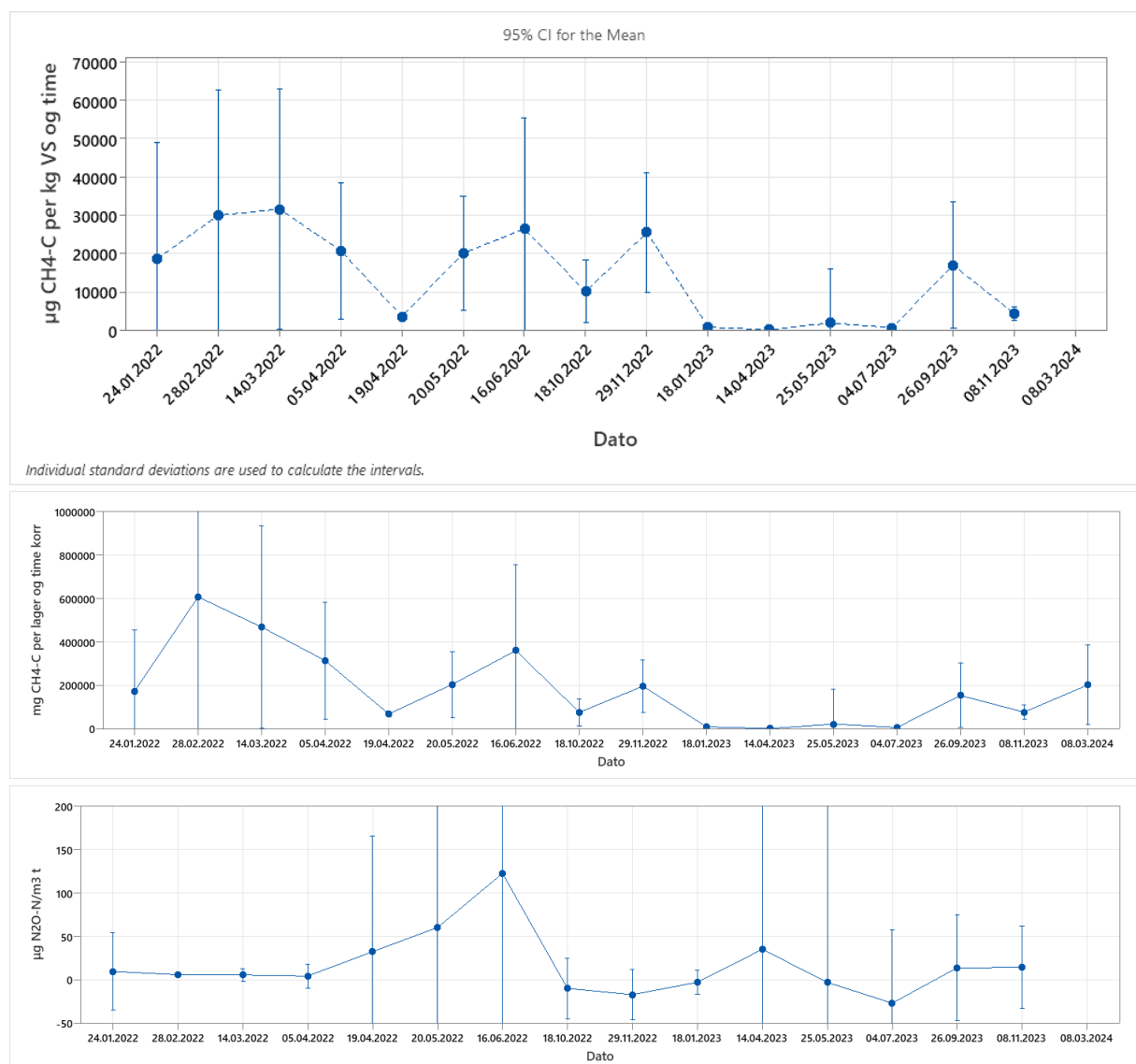
- Sajeev m. fl. 2018. Greenhouse gas and ammonia emissions from different stages of liquid manure management chains: Abatement options and emission interactions. *J. Environ. Qual.* 47, 30–41.
- Smith, K., Cumby, T., Lapworth, J., Misselbrook, T. & Williams, A. 2007. Natural crusting of slurry storage as an abatement measure for ammonia emissions on dairy farms. *Biosyst. Eng.* 97, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.037>.
- Sommer, S.G., Petersen, S.O. & Sogaard, H.T. 2000. Greenhouse gas emission from stored livestock slurry. *J. Environ. Qual.* 29, 744–751.
- Sommer, S. G., Petersen, S. O., Sørensen, P., Poulsen, H. D., & Møller, H. B. 2007. Methane and carbon dioxide emissions and nitrogen turnover during liquid manure storage. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78(1), 27–36. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9072-4>
- Sommer, S.G., Clough, T.J., Balaine, N., Hafner, S.D. & Cameron, K.C. 2017. Transformation of Organic Matter and the Emissions of Methane and Ammonia during Storage of Liquid Manure as Affected by Acidification. *J. Environ. Qual.* 46, 514–521. <https://doi.org/10.2134/JEQ2016.10.0409>
- Tchobanoglous, G. Burton, F. Stensel, H.D. m.fl. 2003. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw-Hill, Boston. [Wastewater engineering : treatment and reuse : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive](https://www.scribd.com/document/38411411/Wastewater-engineering-treatment-and-reuse)
- Theint, E.E., Bellingrath-Kimura, S.D., Oo, A.Z. & Motobayashi, T. 2016. Influence of gypsum amendment on methane emission from paddy soil affected by saline irrigation water. *Front. Environ. Sci.* 3, 164221. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2015.00079/BIBTEX>
- VanderZaag, A.C., Gordon, R.J., Jamieson, R.C., Burton, D.L. & Stratton, G.W. 2010. Effects of winter storage conditions and subsequent agitation on gaseous emissions from liquid dairy manure. *Can. J. Soil Sci.* 90, 229–239. <https://doi.org/10.4141/CJSS09040>
- VanderZaag, A. C., Baldé, H., Crolla, A., Gordon, R. J., Ngwabie, N. M., Wagner-Riddle, C., Desjardins, R. & MacDonald, J. D. 2018. Potential methane emission reductions for two manure treatment technologies. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 39(7), 851–858. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1313317>
- Vechi, N. T., Mellqvist, J. & Scheutz, C. 2022. Quantification of methane emissions from cattle farms, using the tracer gas dispersion method. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107885>
- Vechi, N. T., Falk, J. M., Fredenslund, A. M., Edjabou, M. E. & Scheutz, C. 2023. Methane emission rates averaged over a year from ten farm-scale manure storage tanks. *Science of The Total Environment*, 904, 166610. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166610>

10 Vedlegg

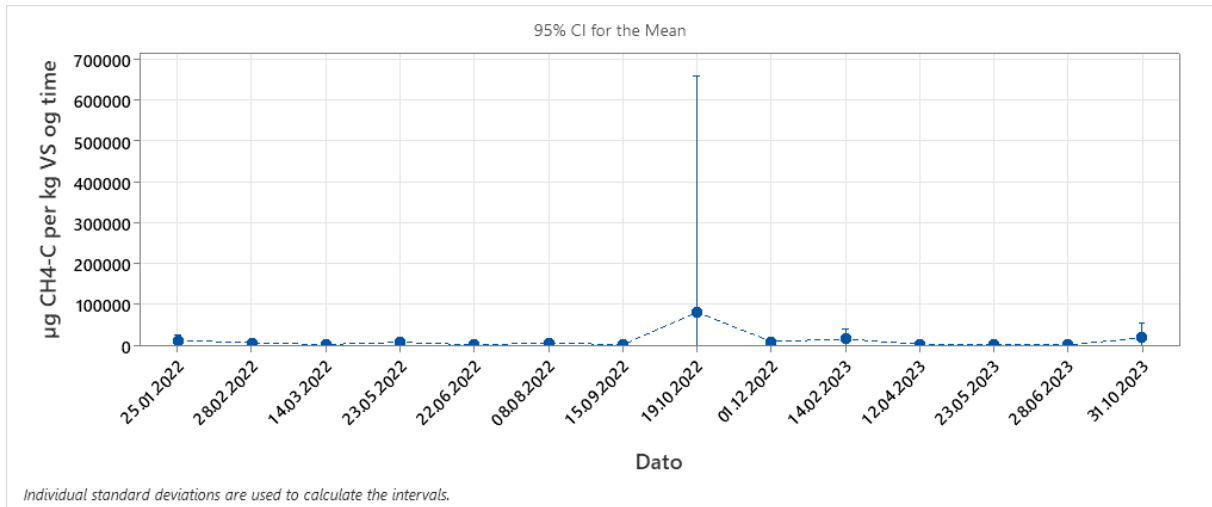
Diagram over registrerte parametere på gårder hvor det ble undersøkt gassutslipp

10.1 Gårder med kjeller, to gårder

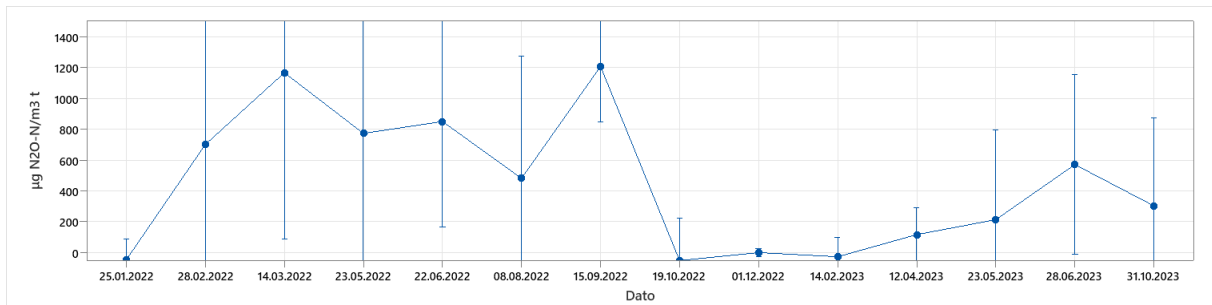
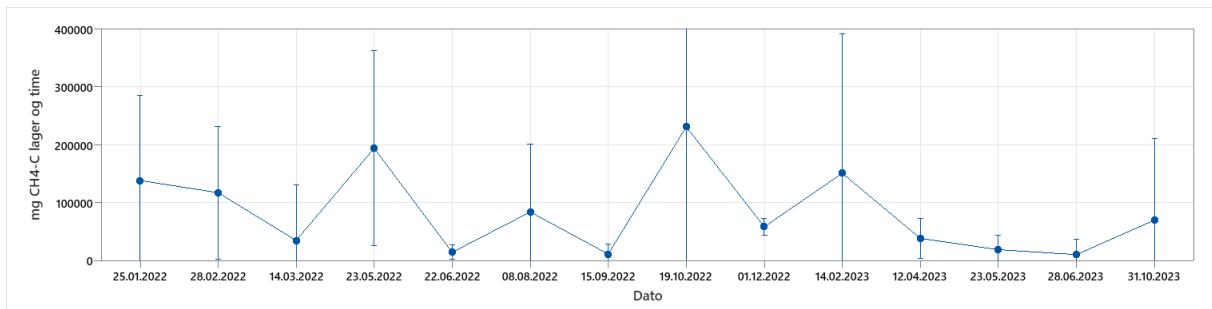
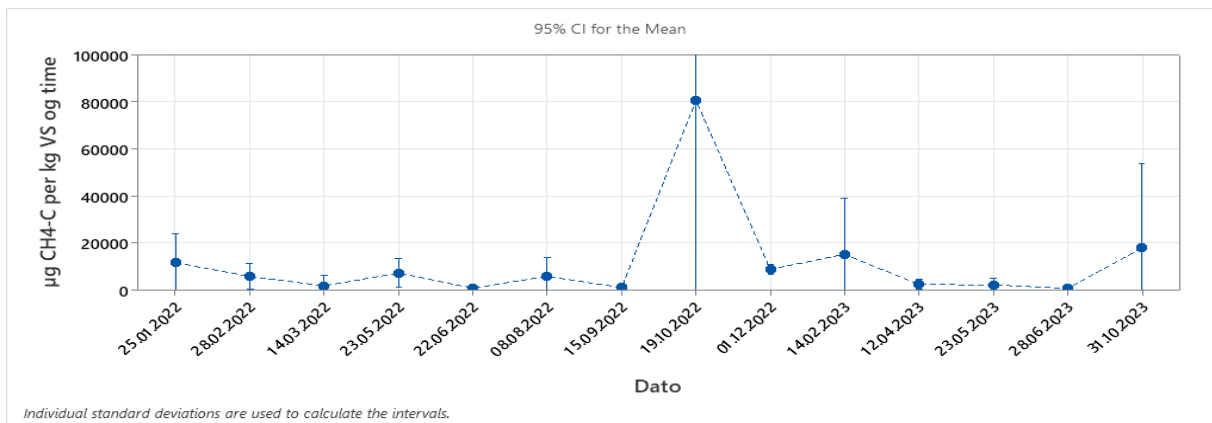
Gjødsellager 1



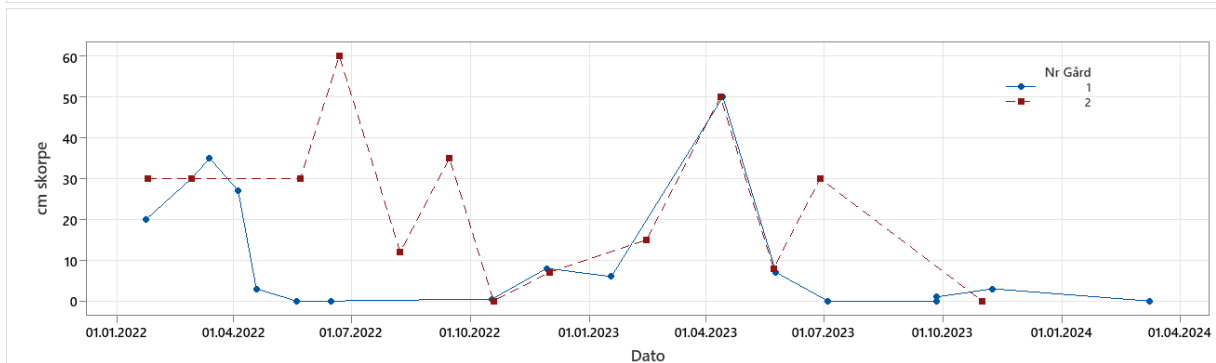
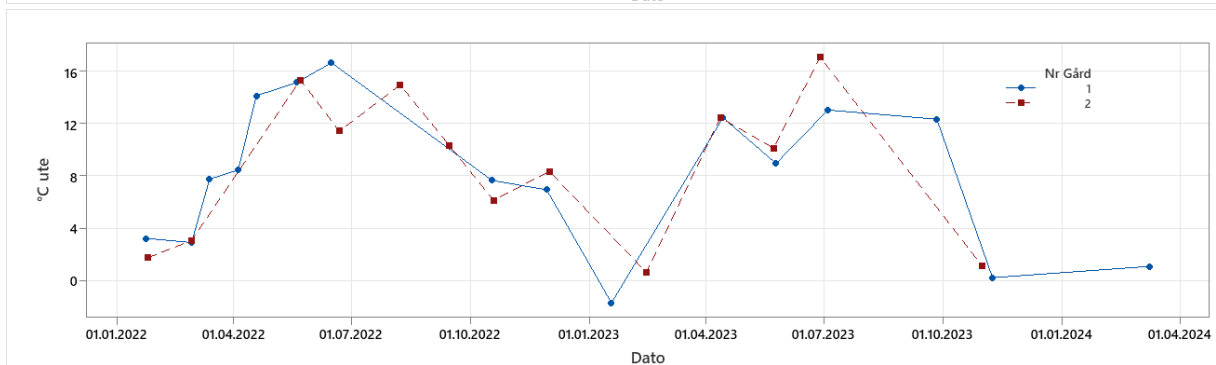
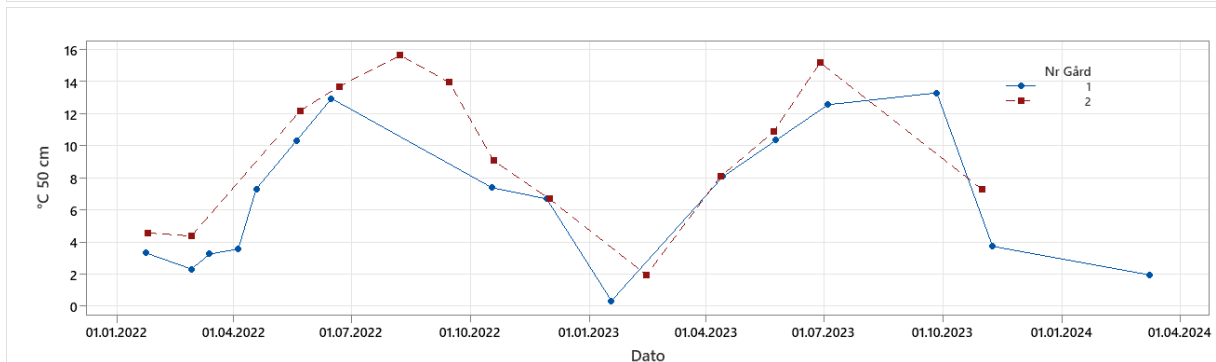
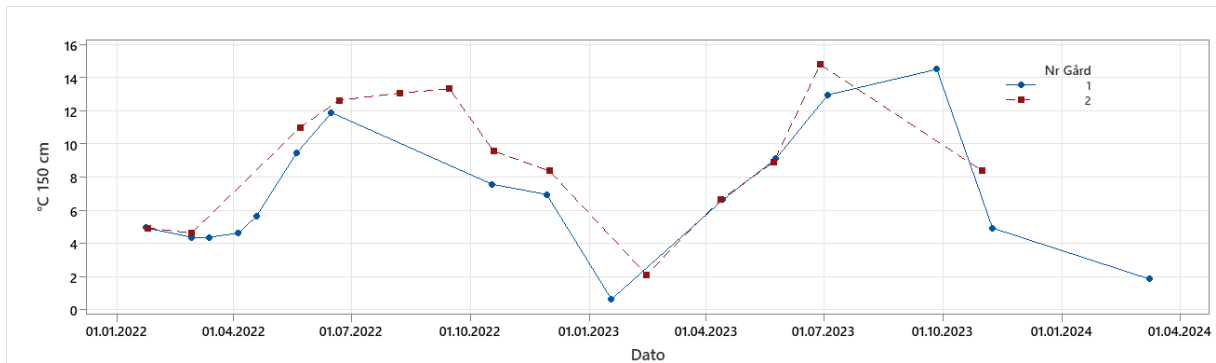
Gjødsellager 2

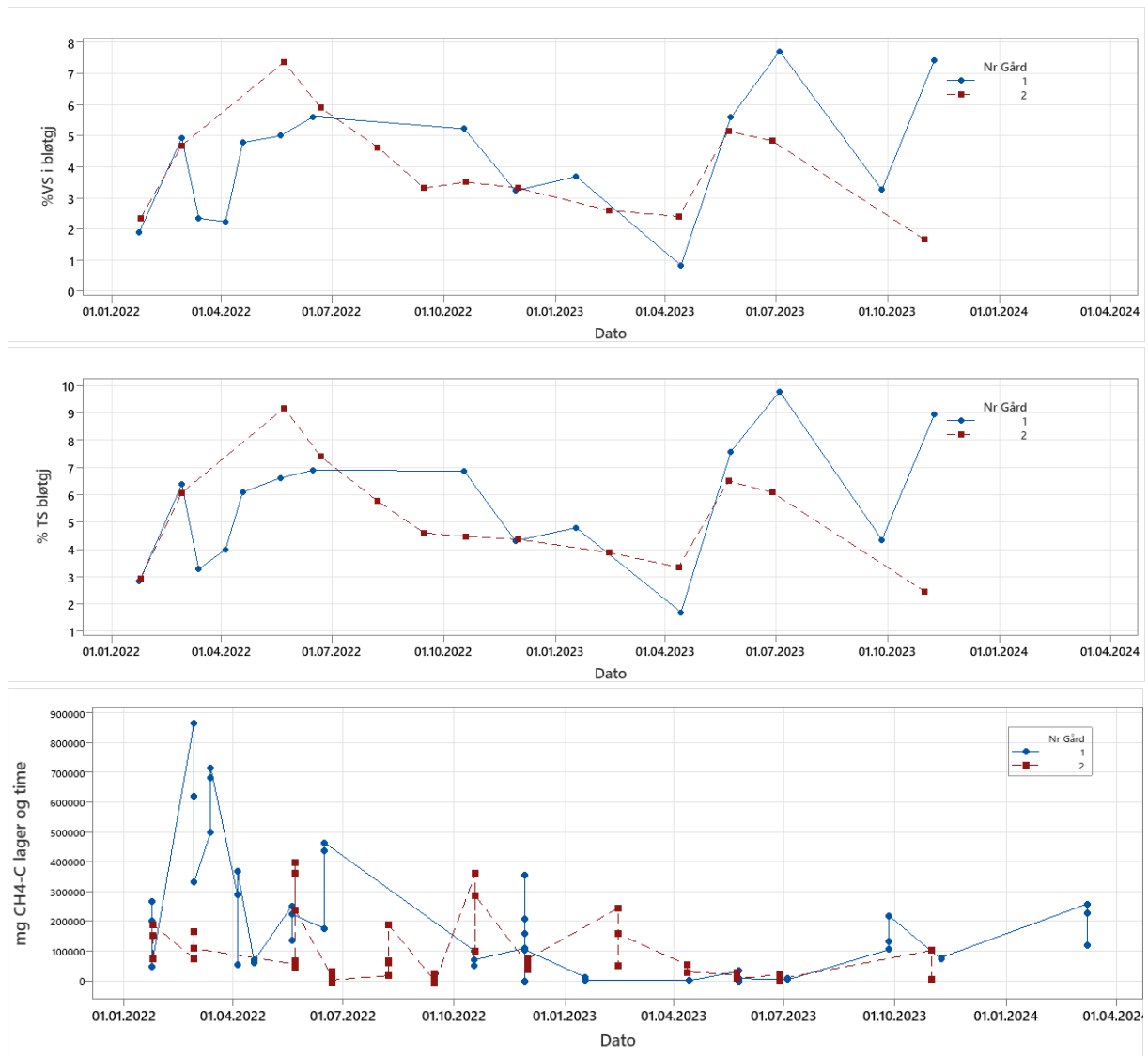


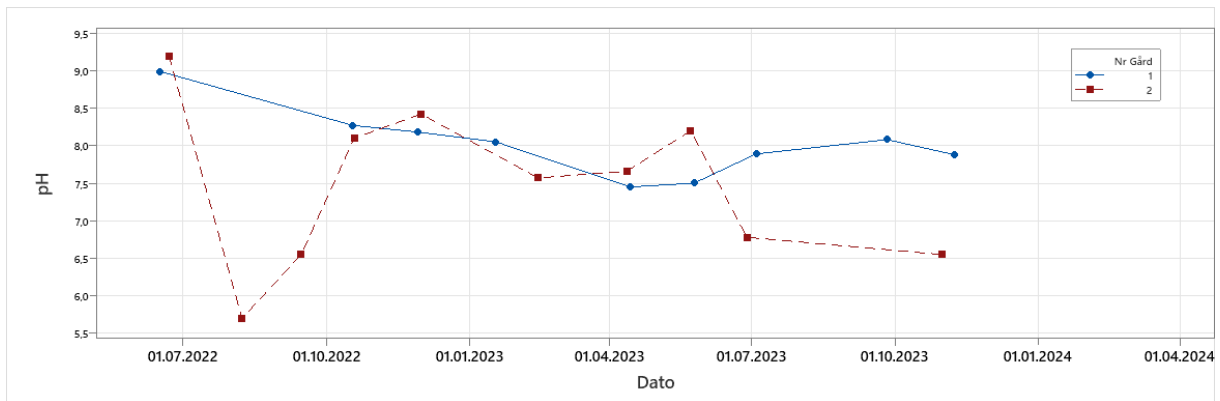
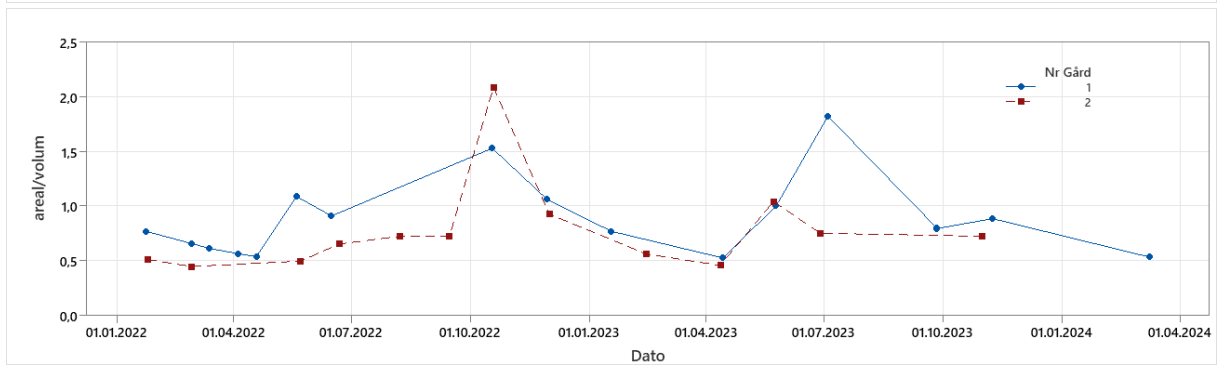
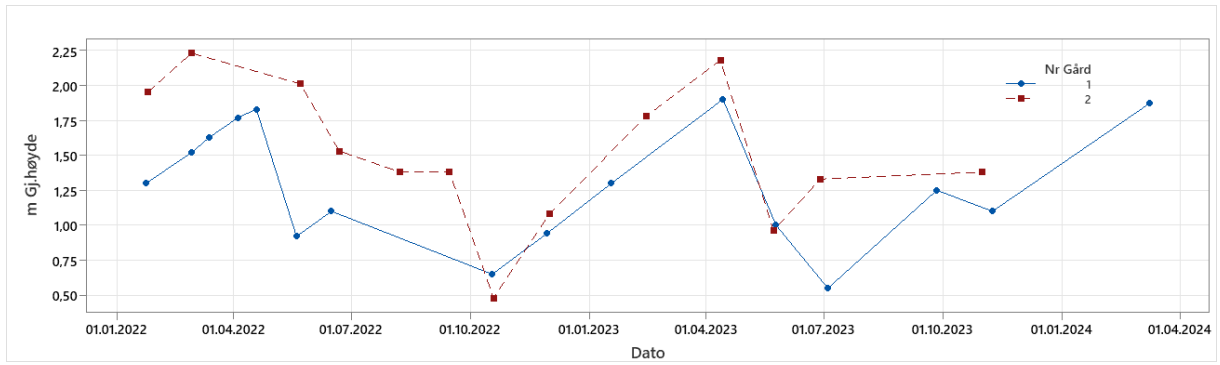
Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner



Gjødsellager 1 & 2

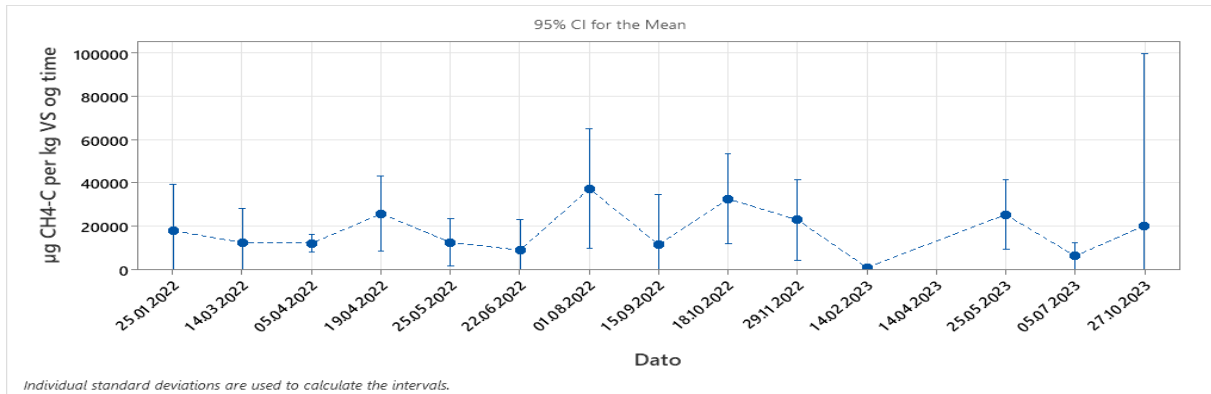




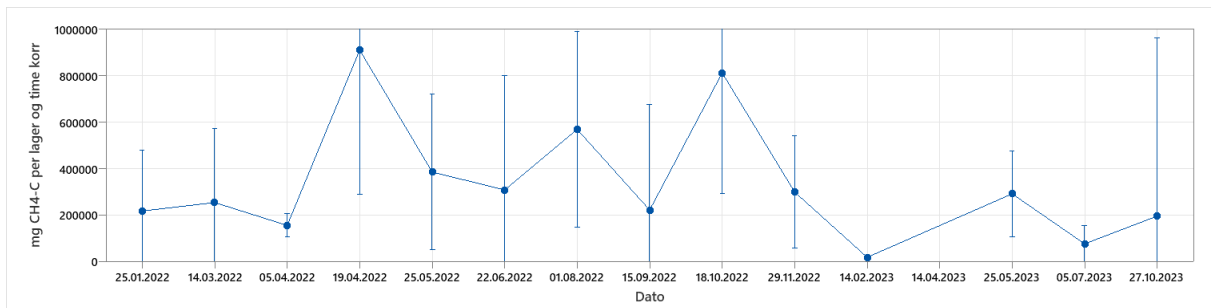
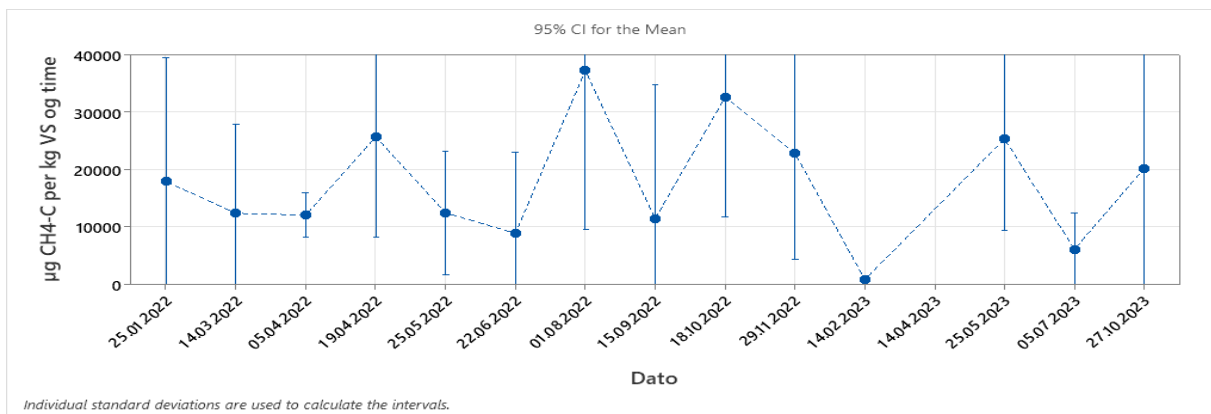


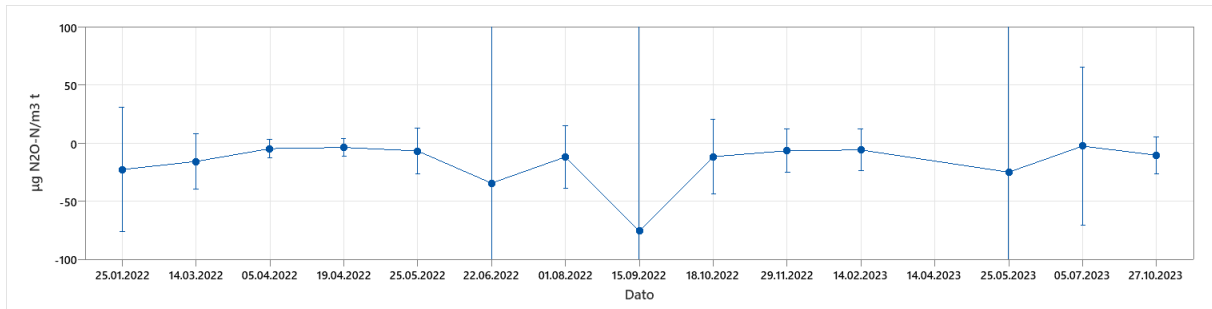
10.2 Gårder med åpen kum, to gårder

Gjødsellager 3

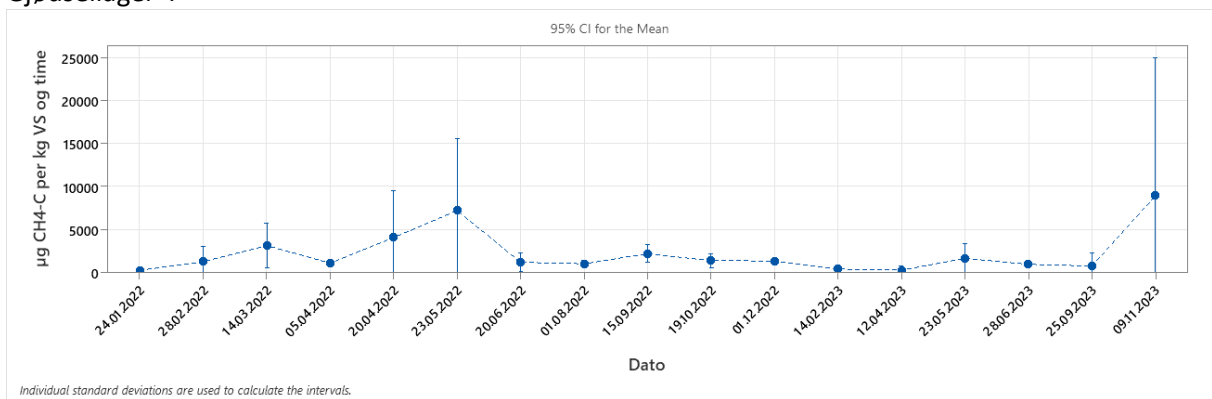


Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner

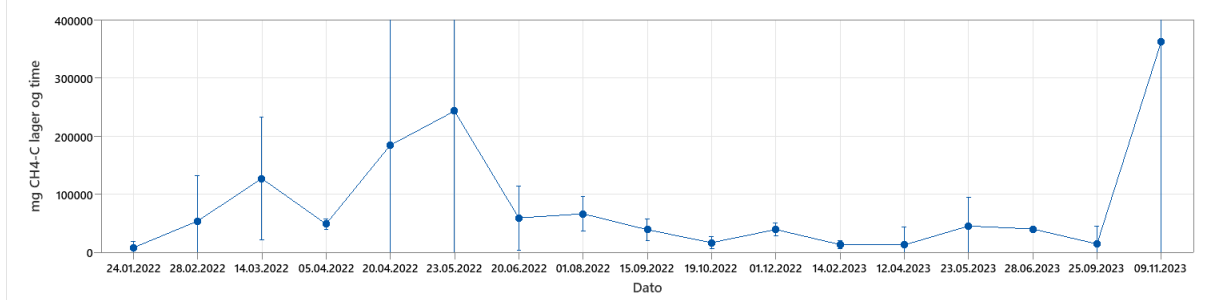
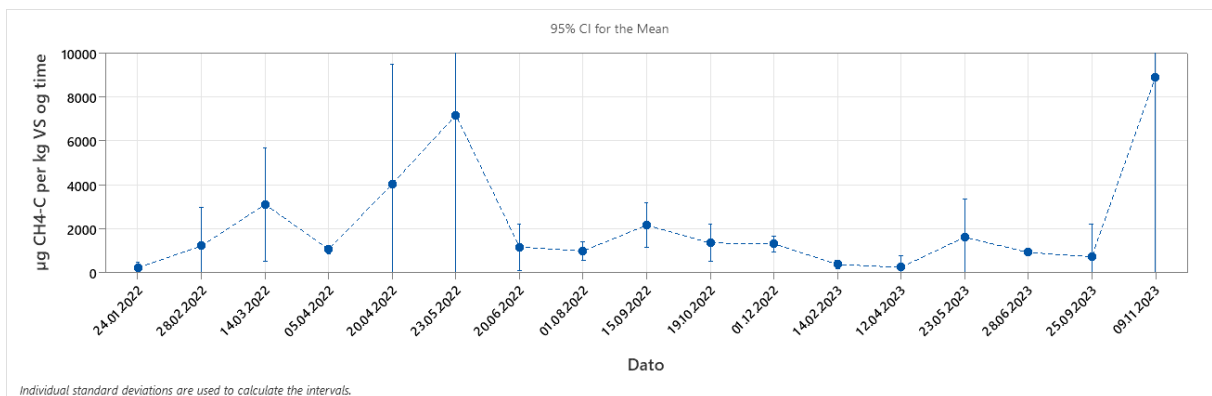


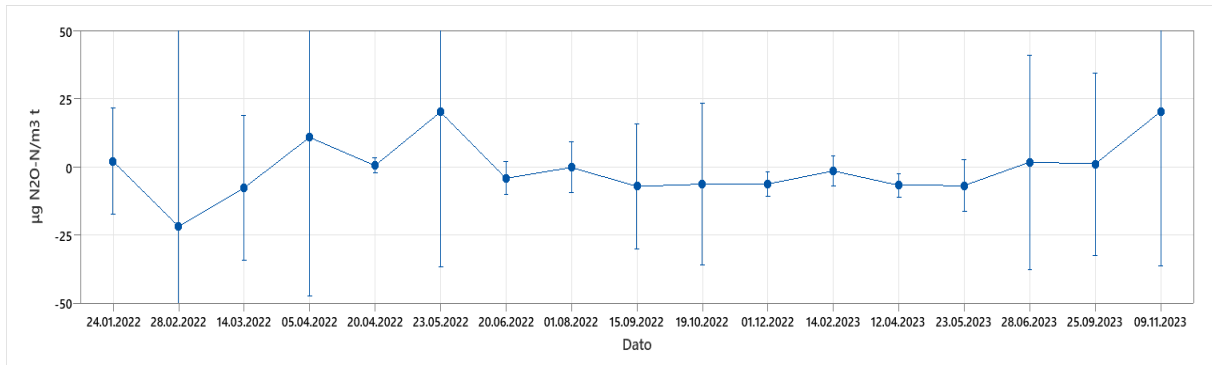


Gjødsellager 4

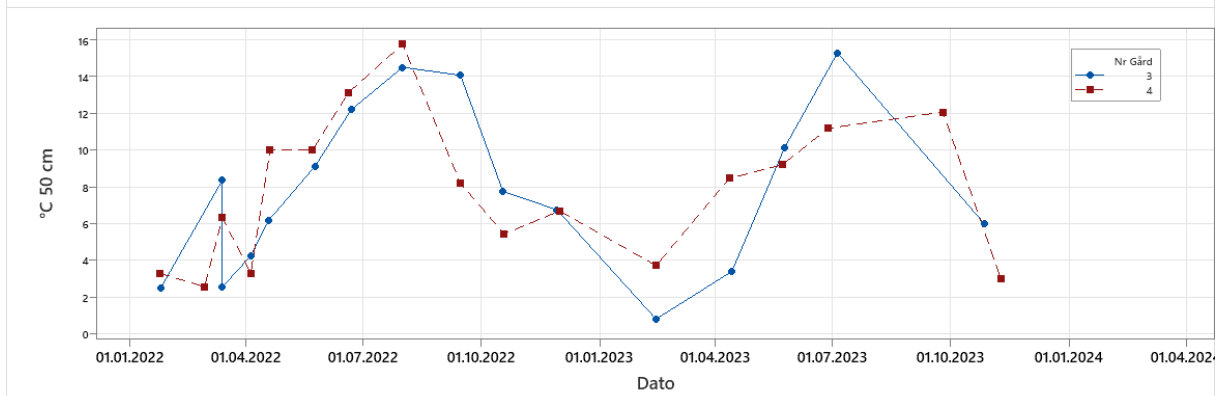
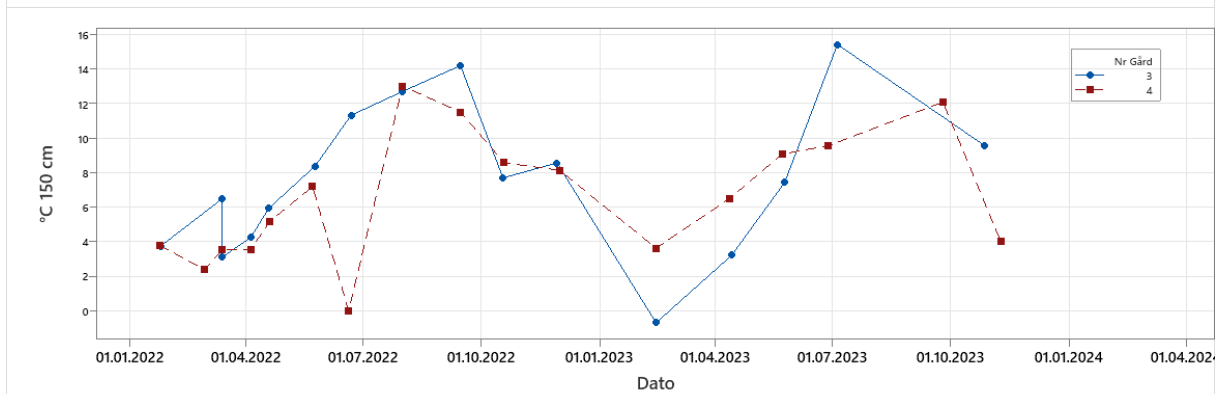
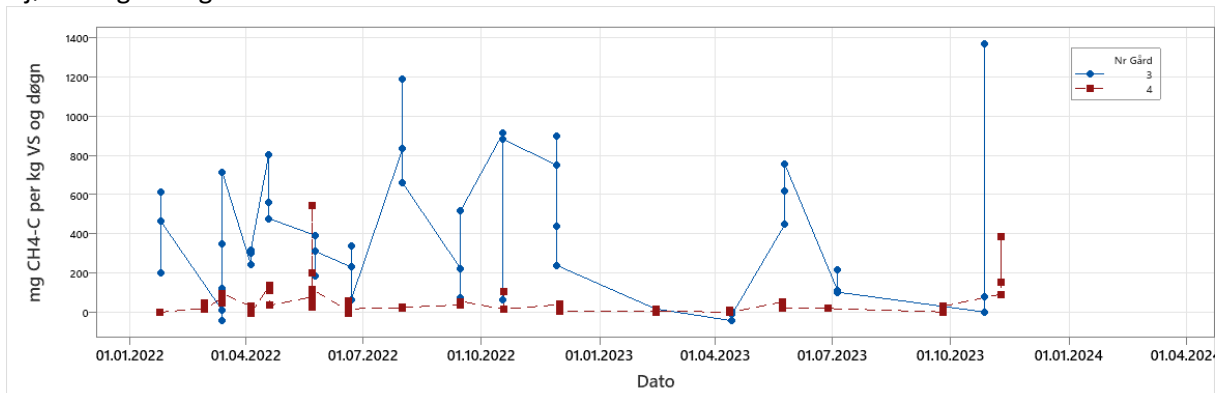


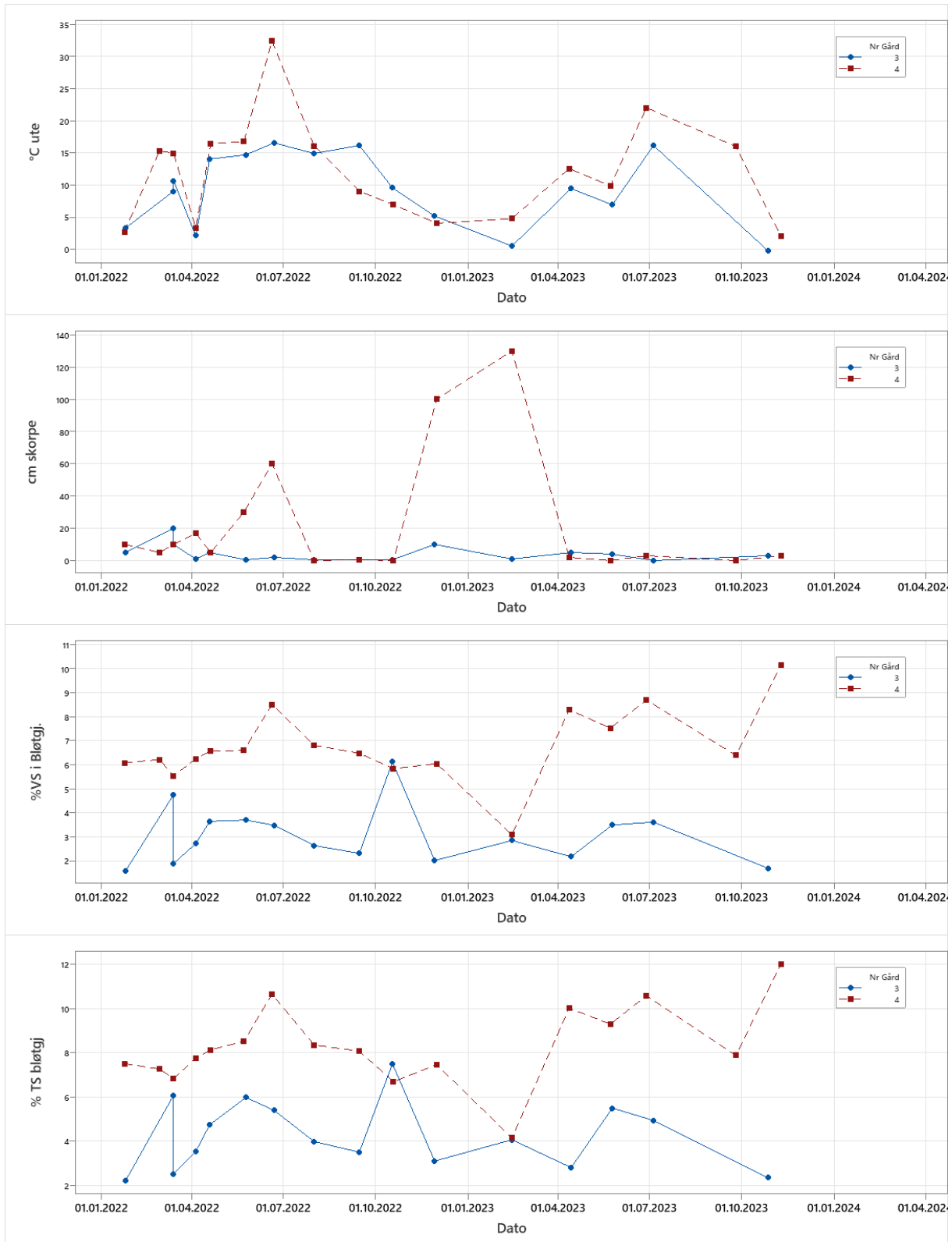
Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner

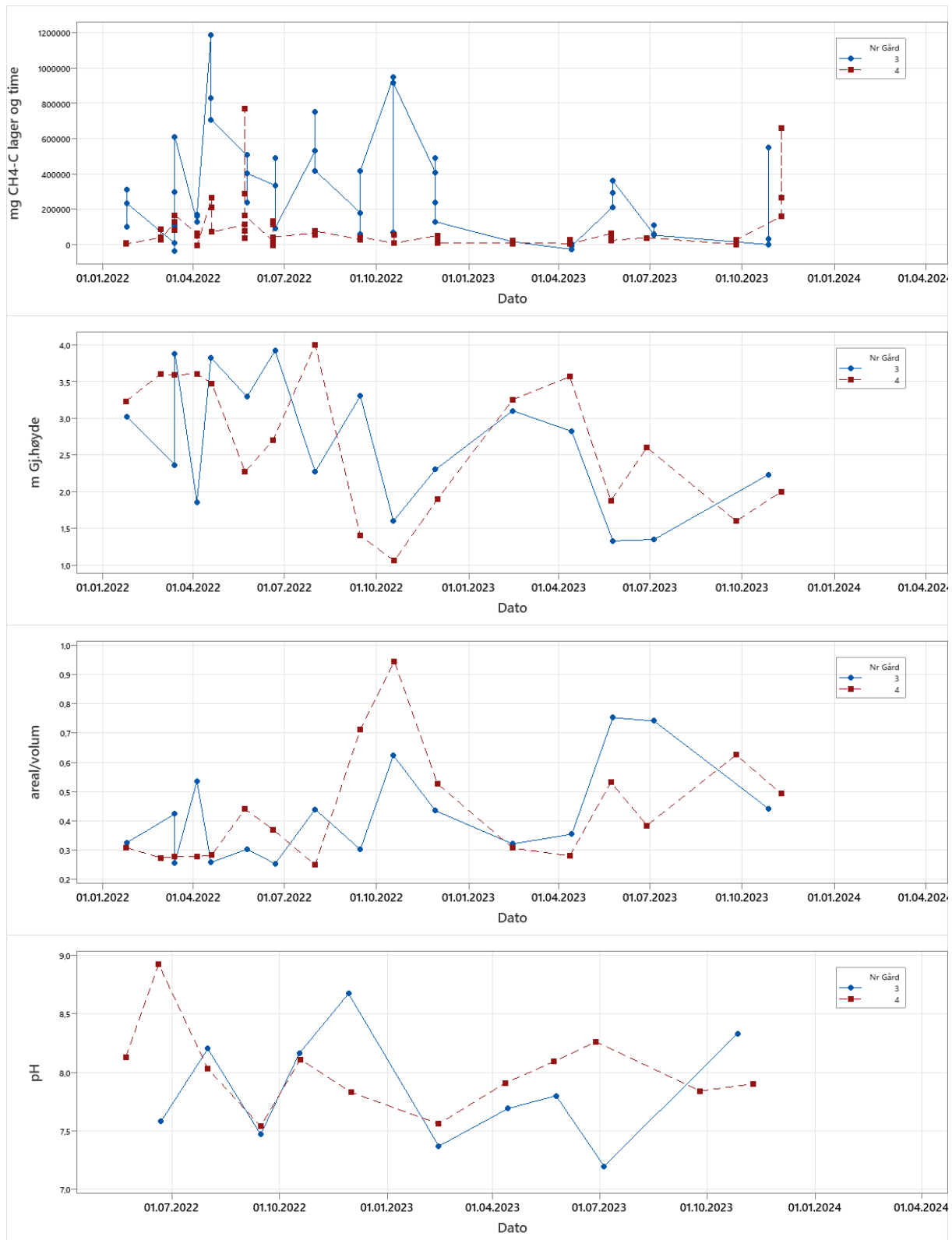




Gjødsellager 3 og 4

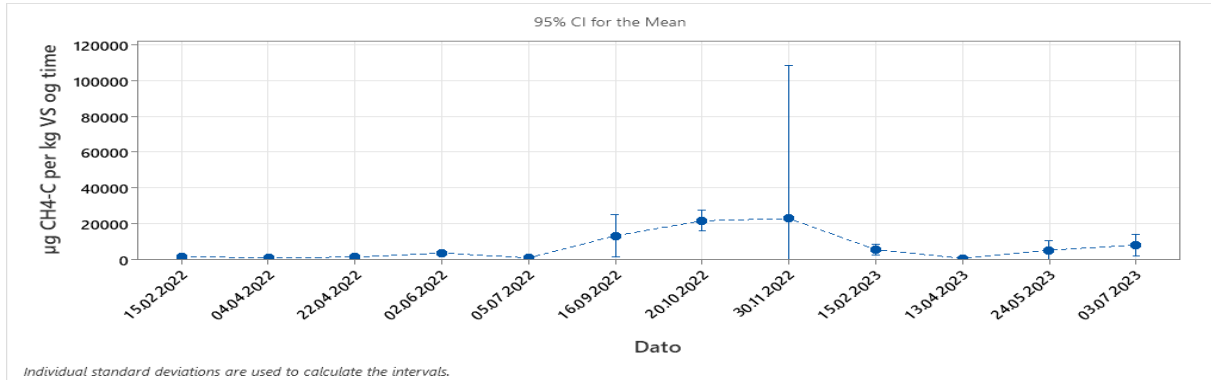




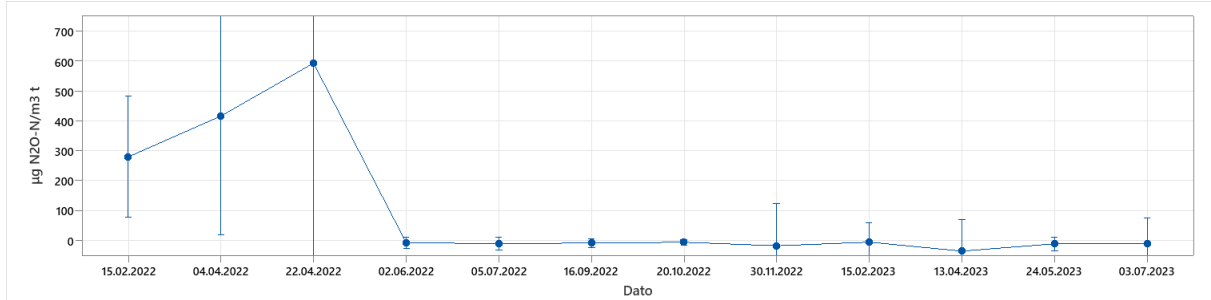
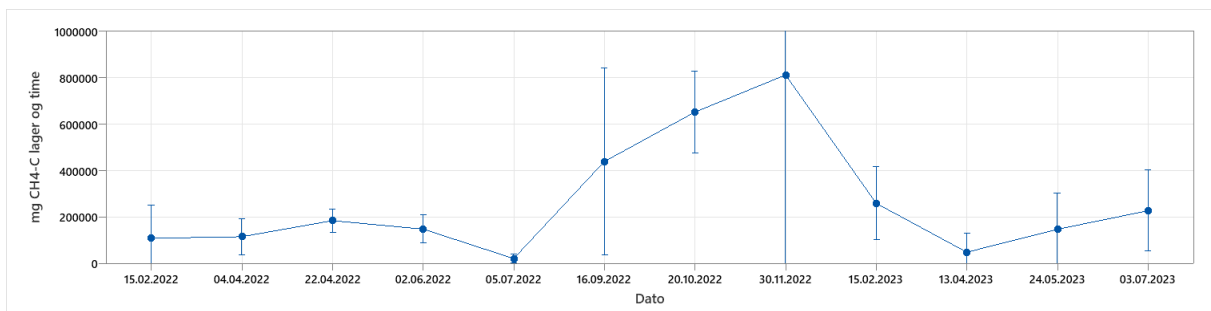
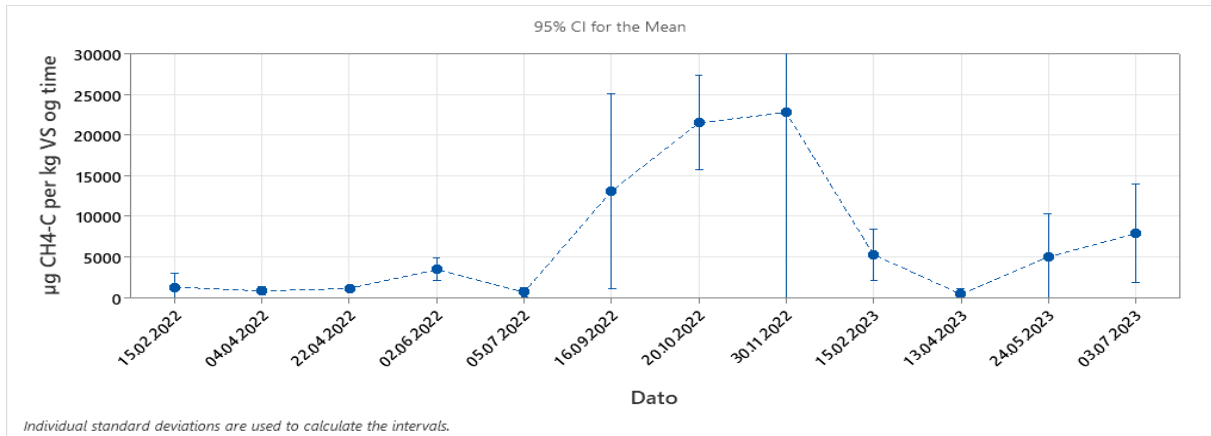


10.3 Gårder med kum med tak, ny gjødsel under skorpa, to gårder

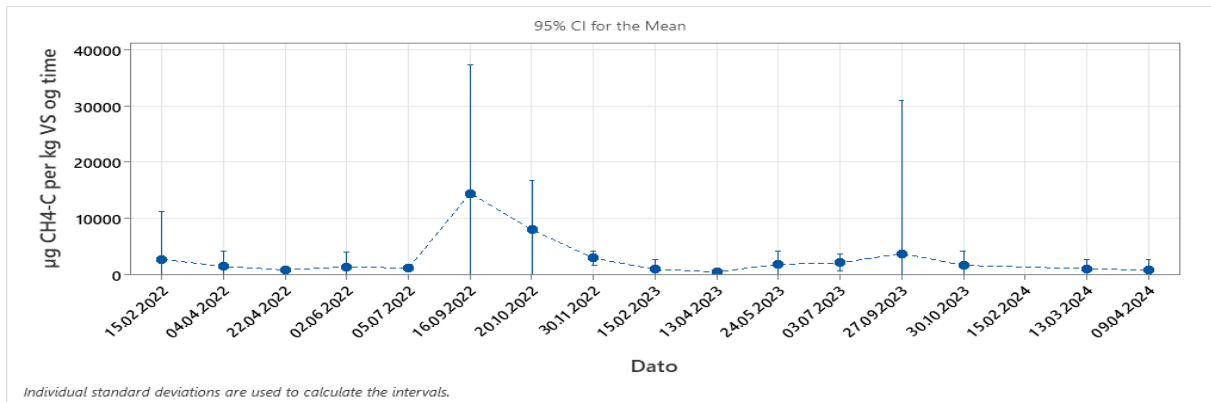
Gjødsellager 5



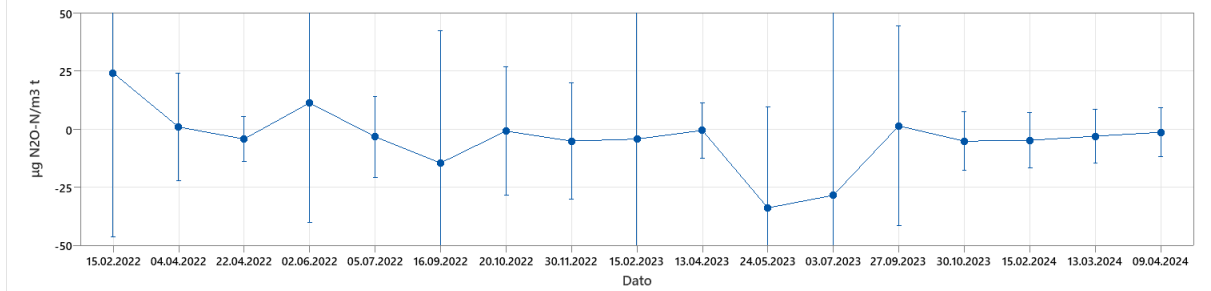
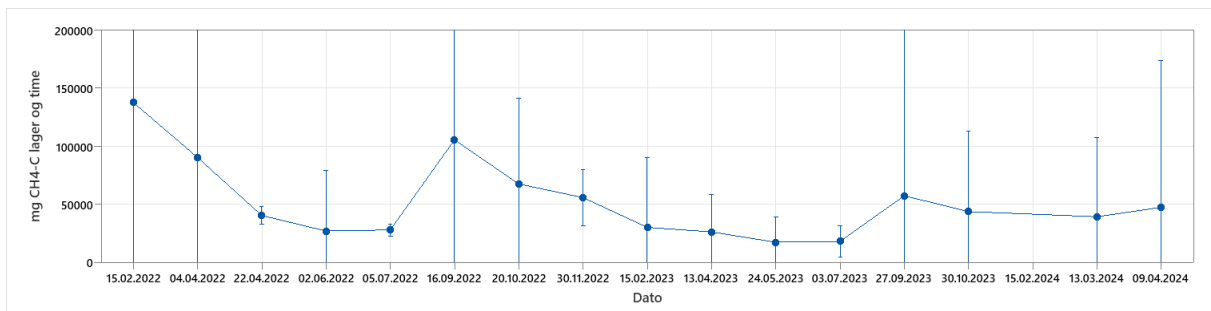
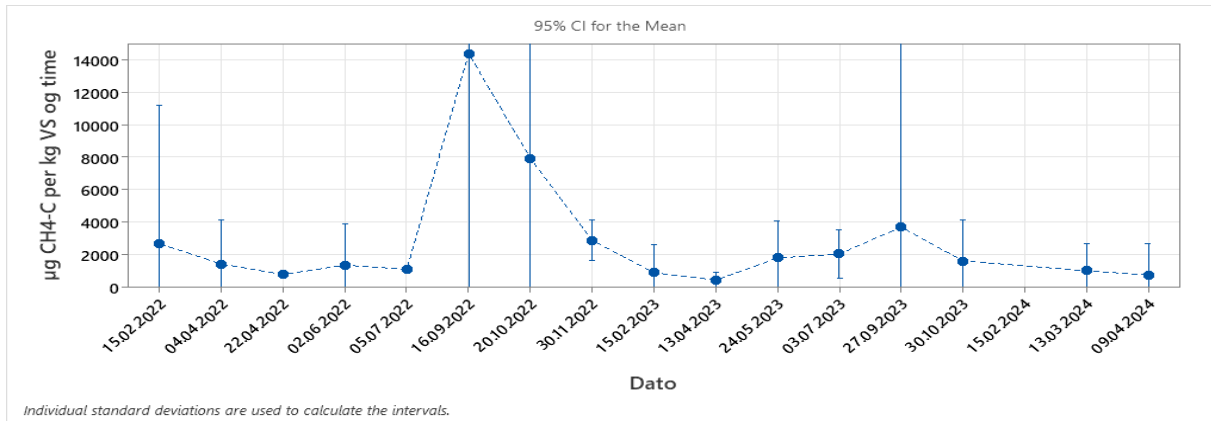
Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner



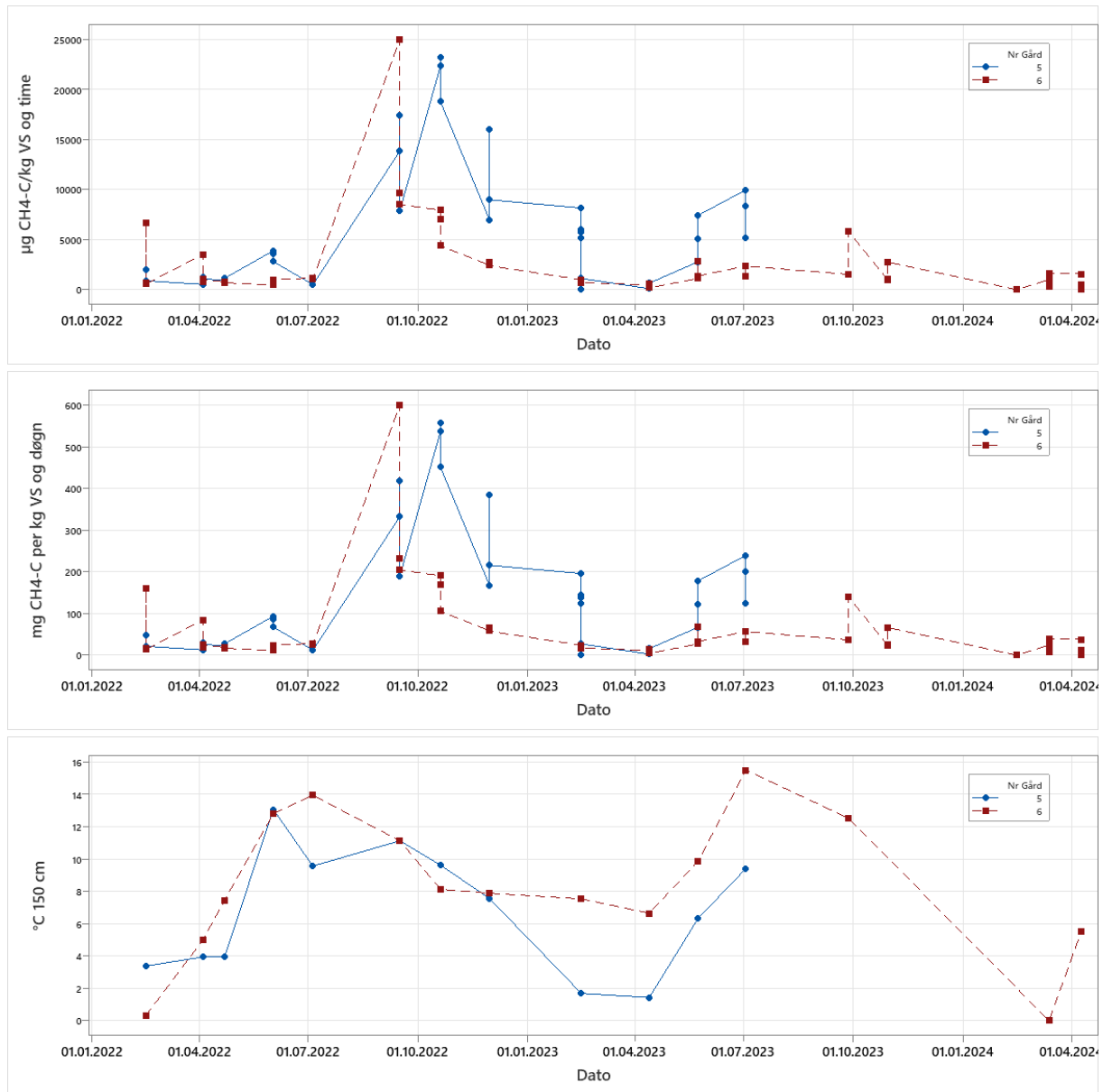
Gjødsellager 6

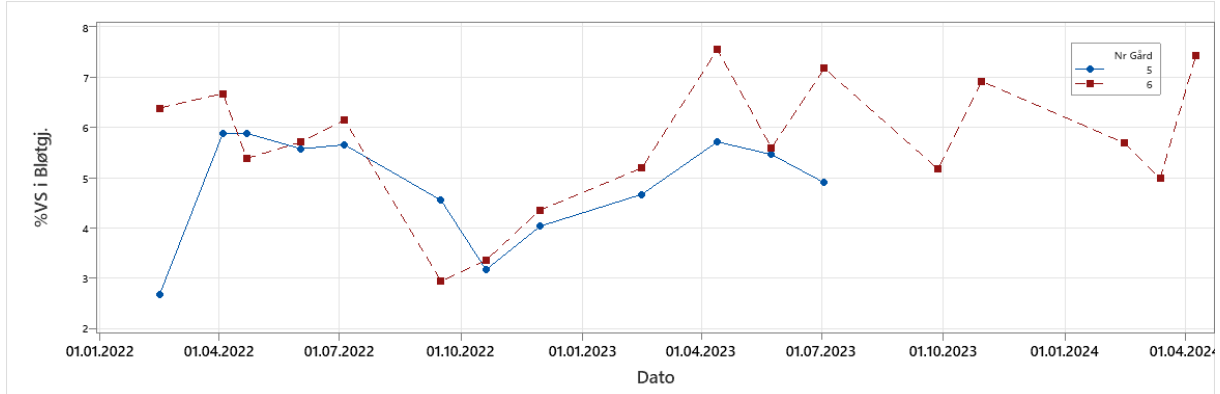
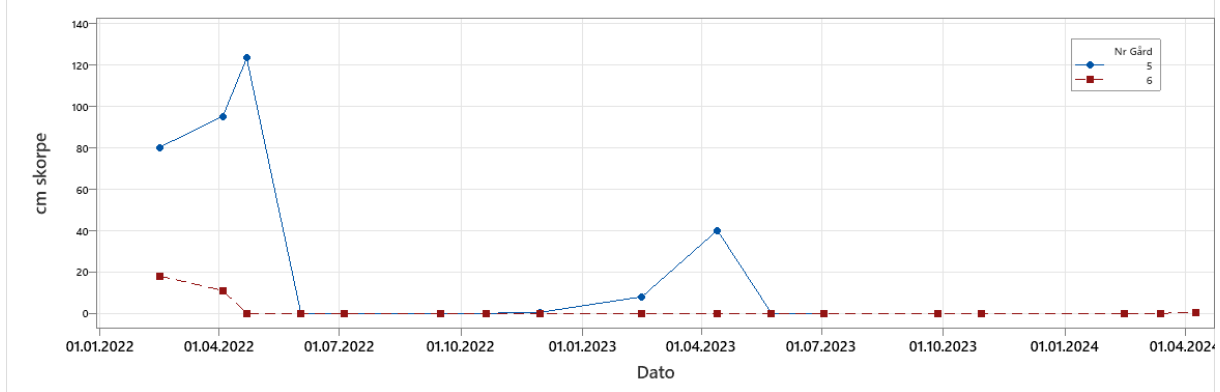
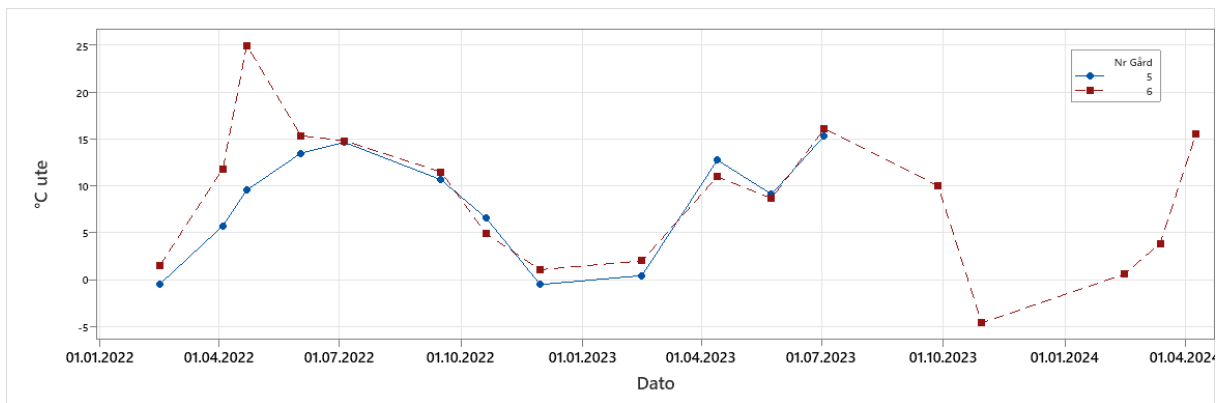
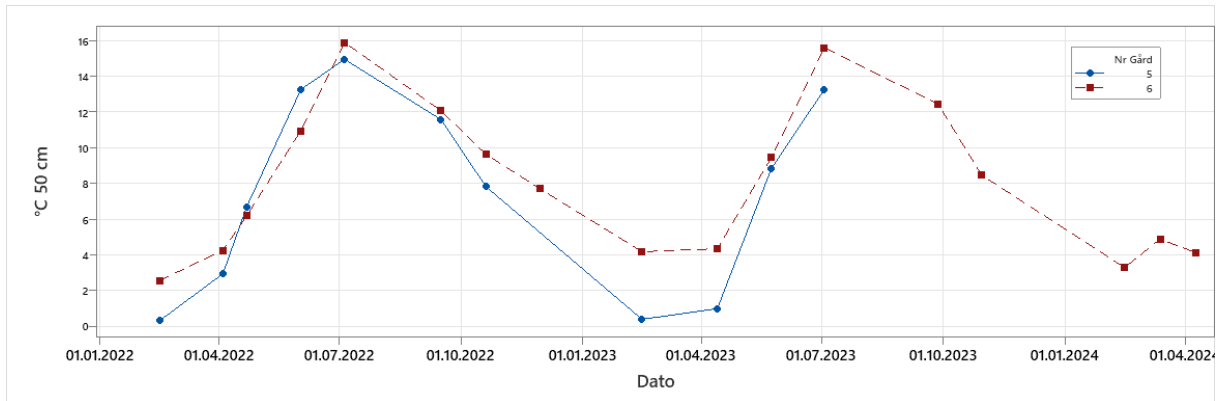


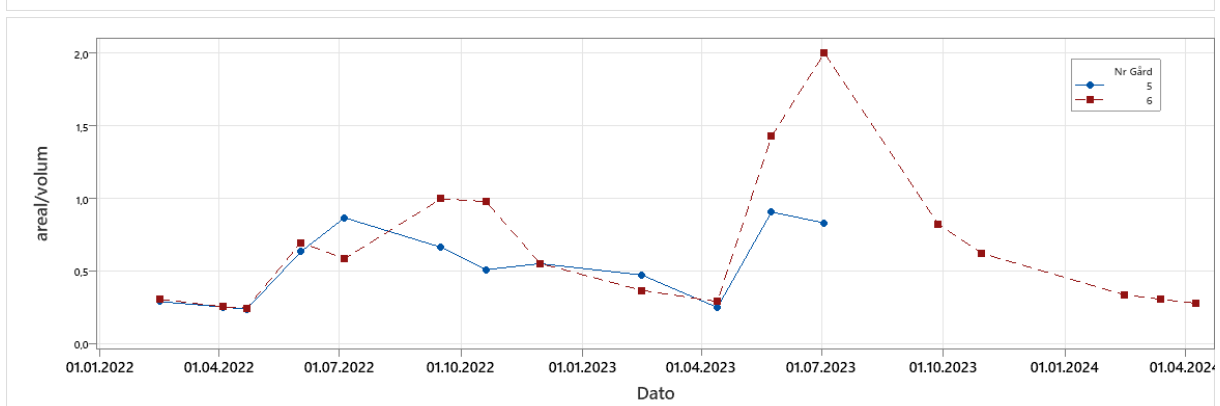
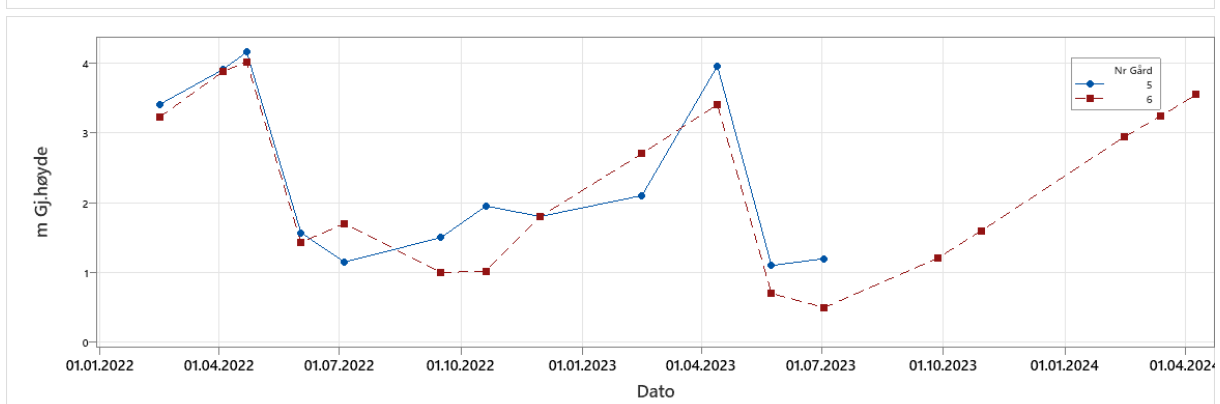
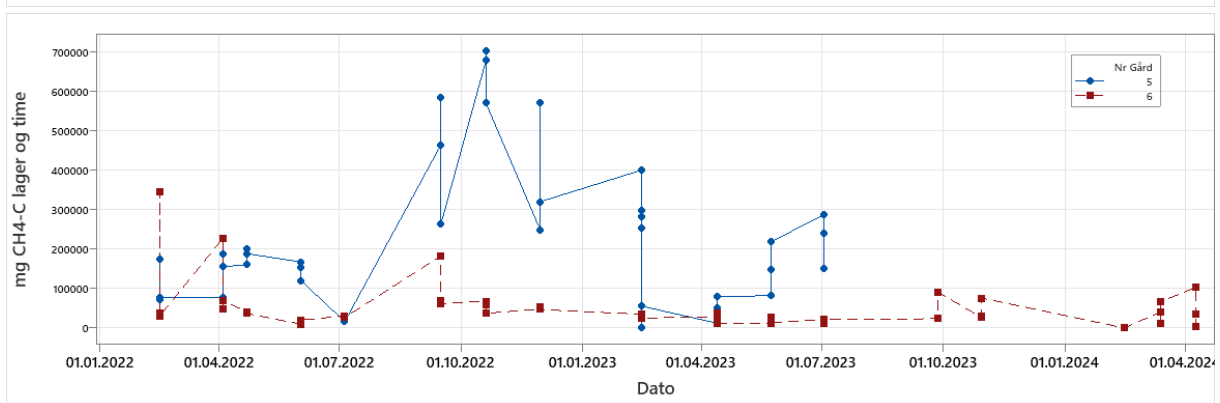
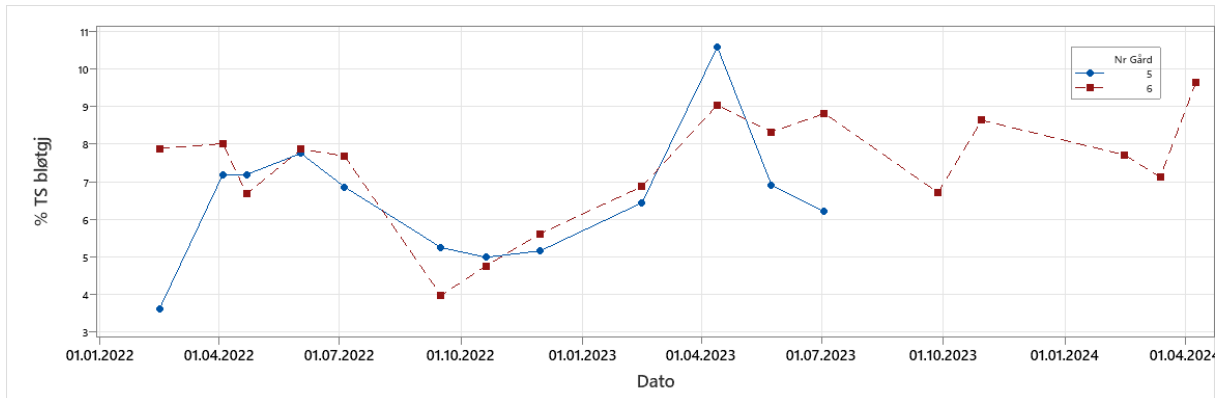
Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner

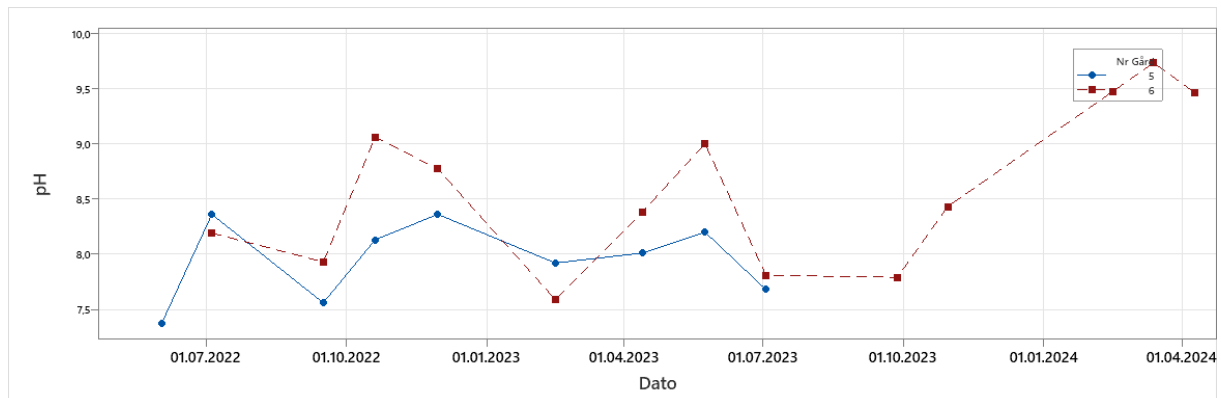


Gjødsellager 5 og 6



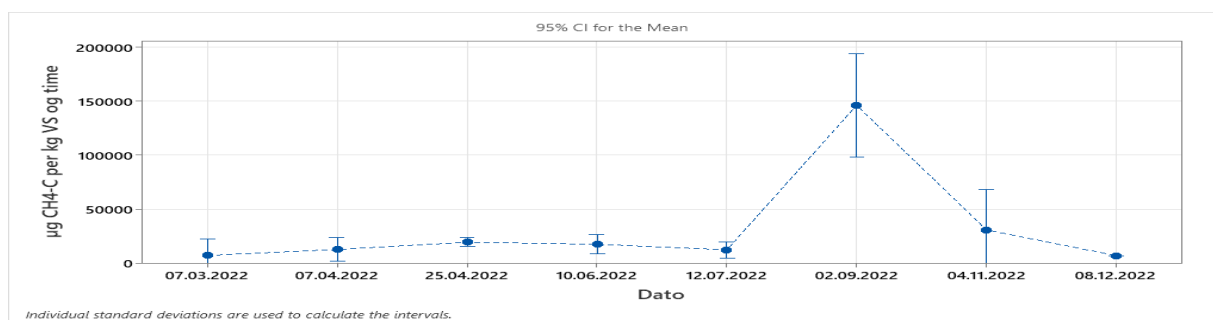




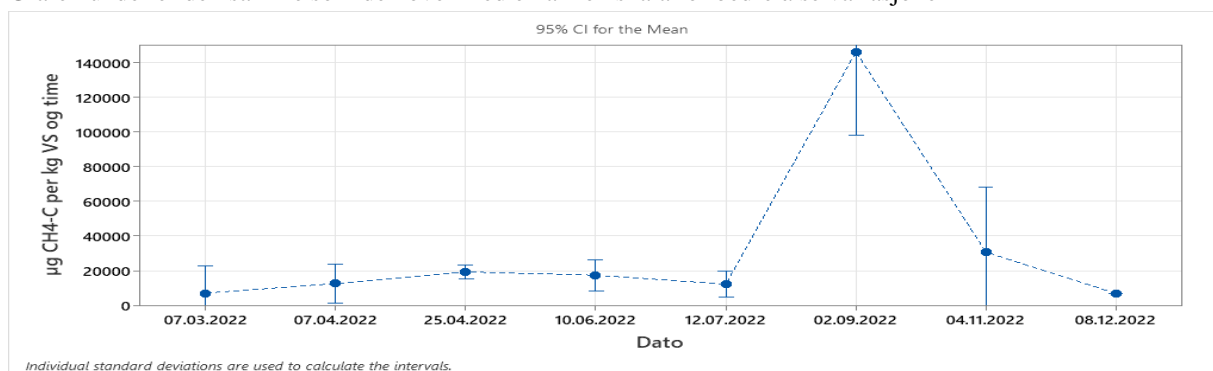


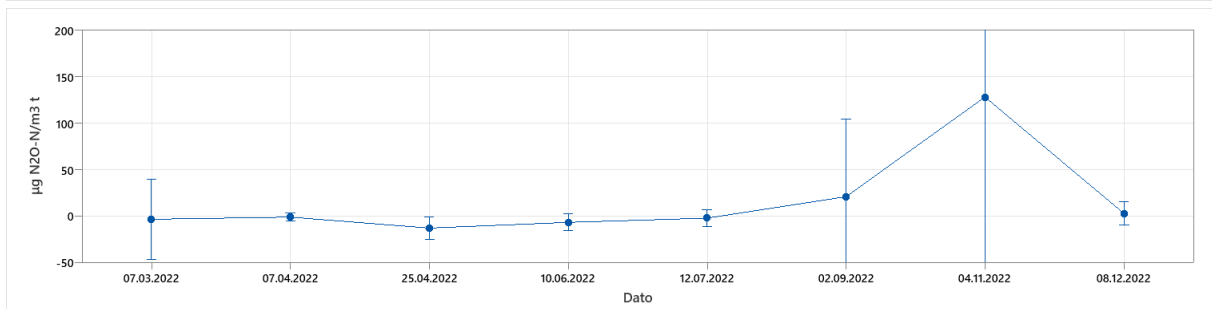
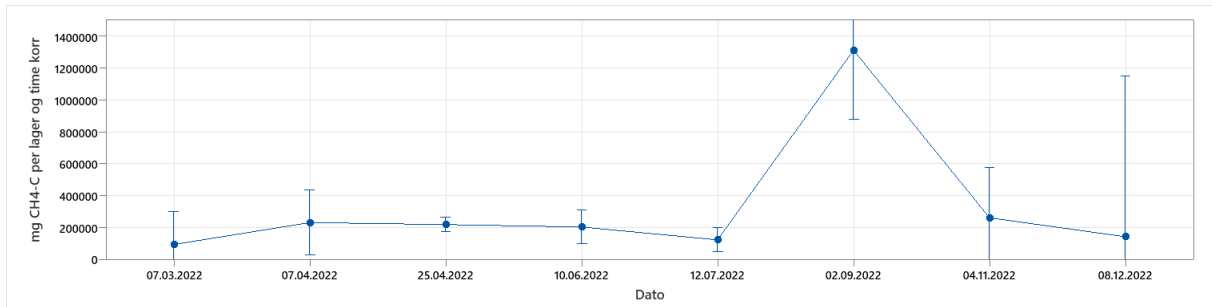
10.4 Gårder med kum med biorest, ny gjødsel ovenfra, to gårder

Gjødsellager 7 med Plany-dekke

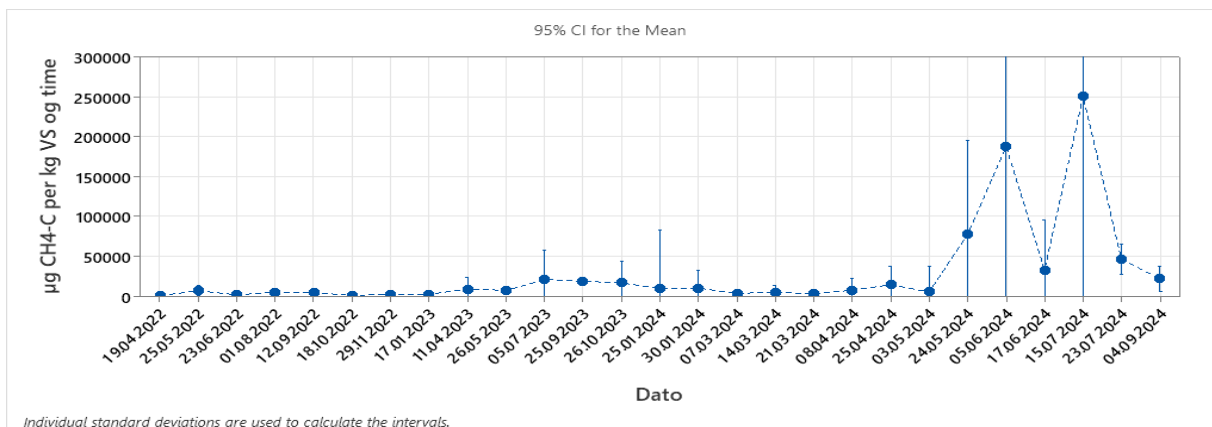
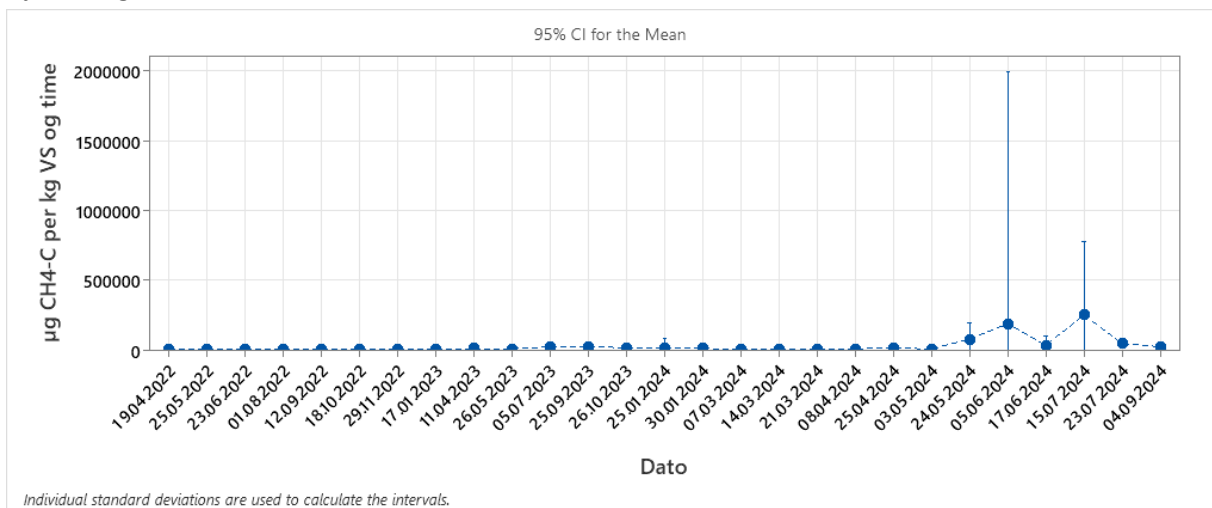


Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner

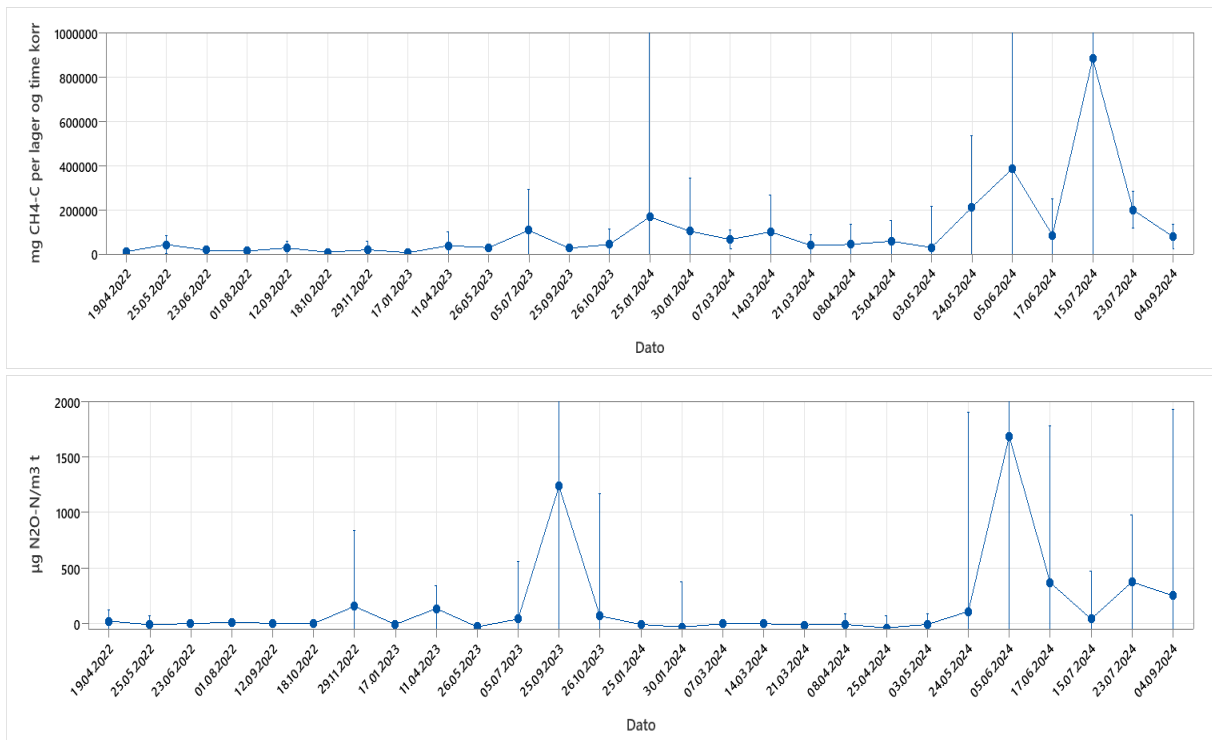




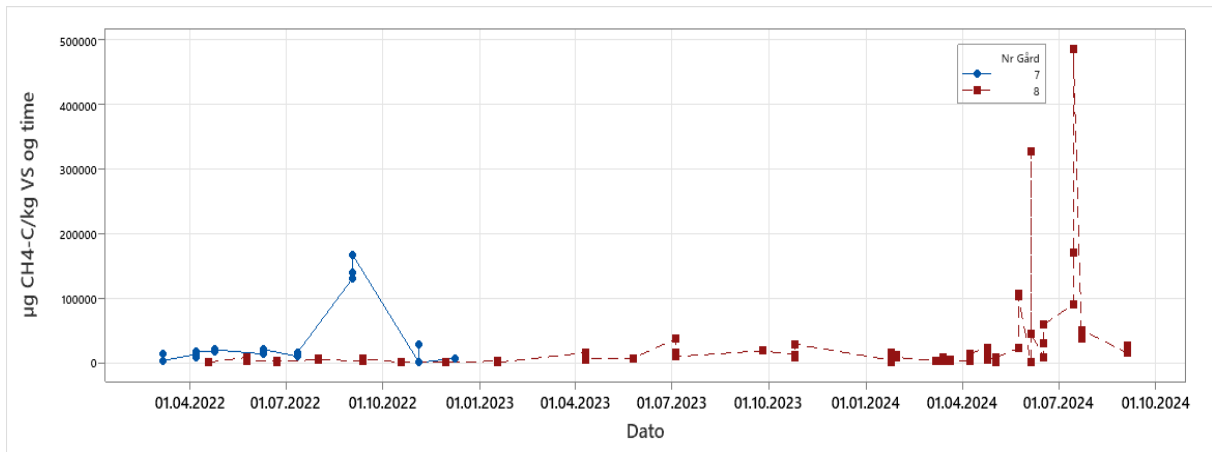
Gjødsellager 8 med PVC-tak

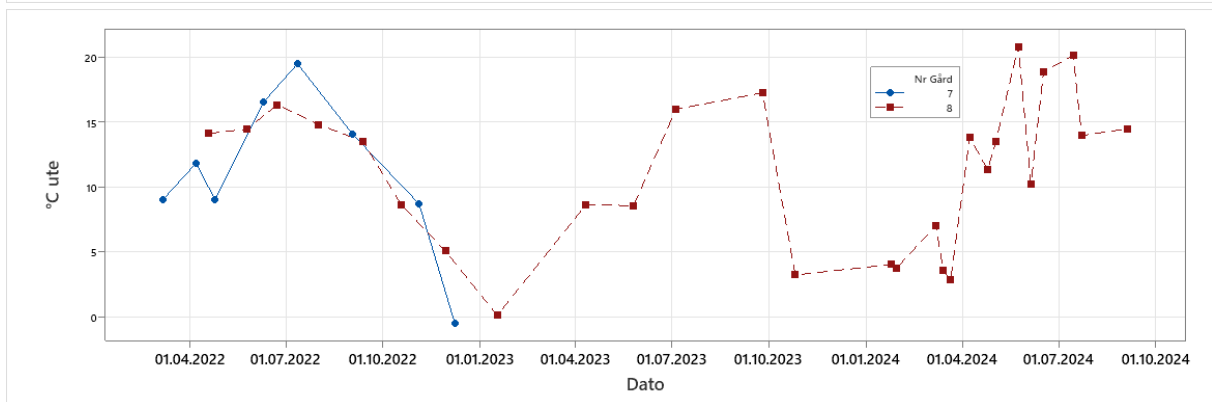
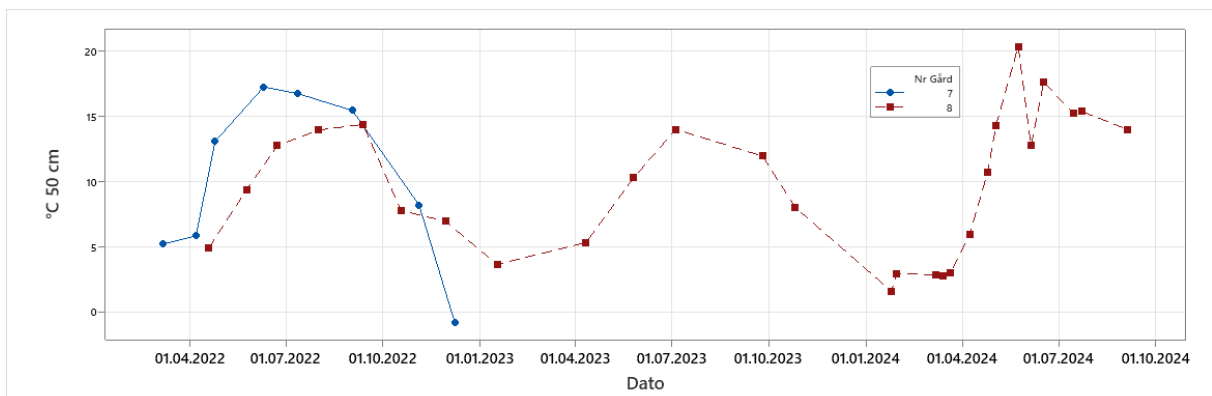
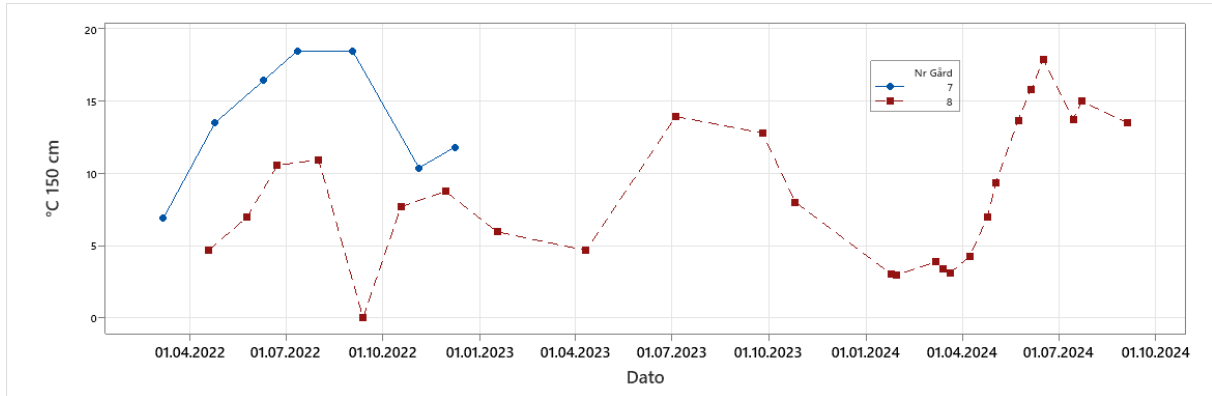
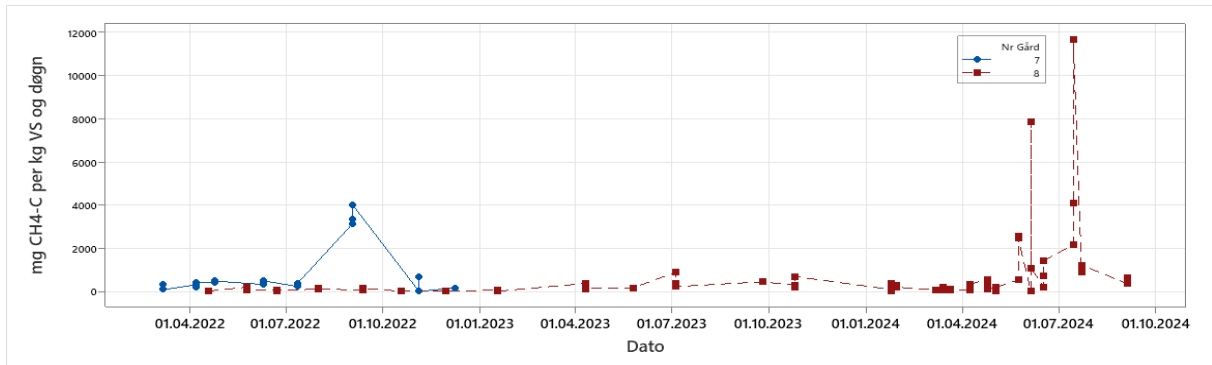


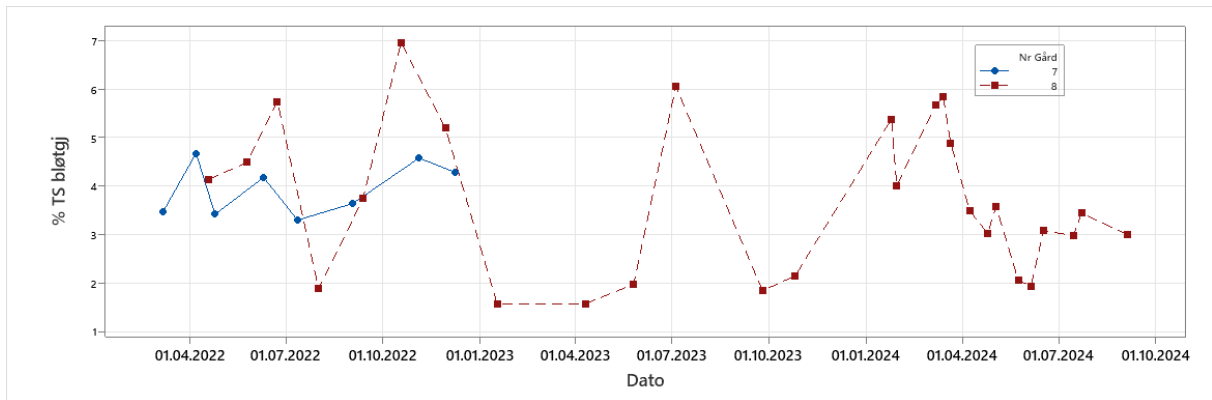
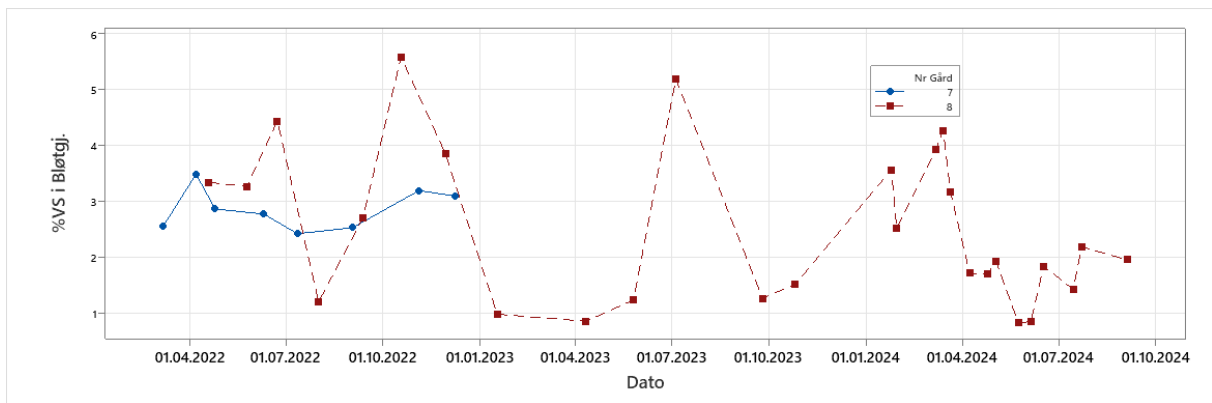
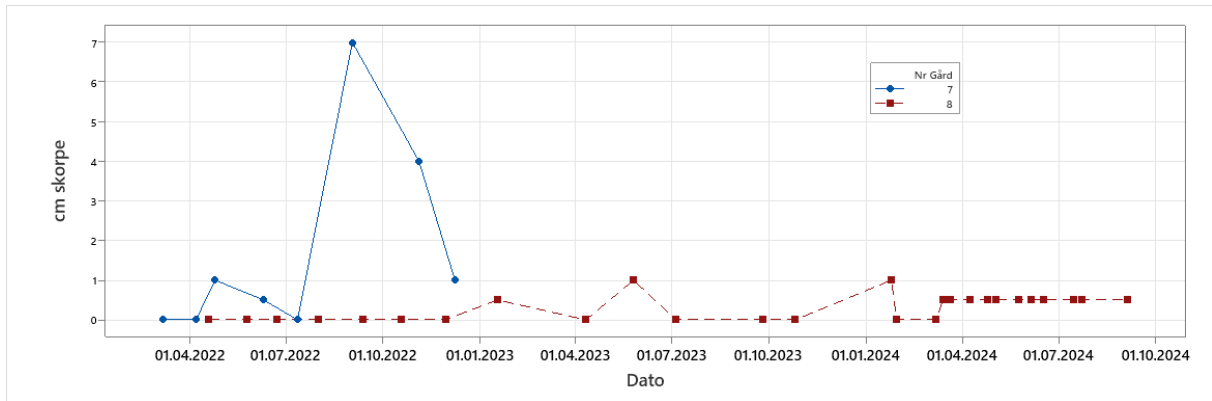
Grafen under er den samme som den over med en annen skala for bedre å se variasjoner

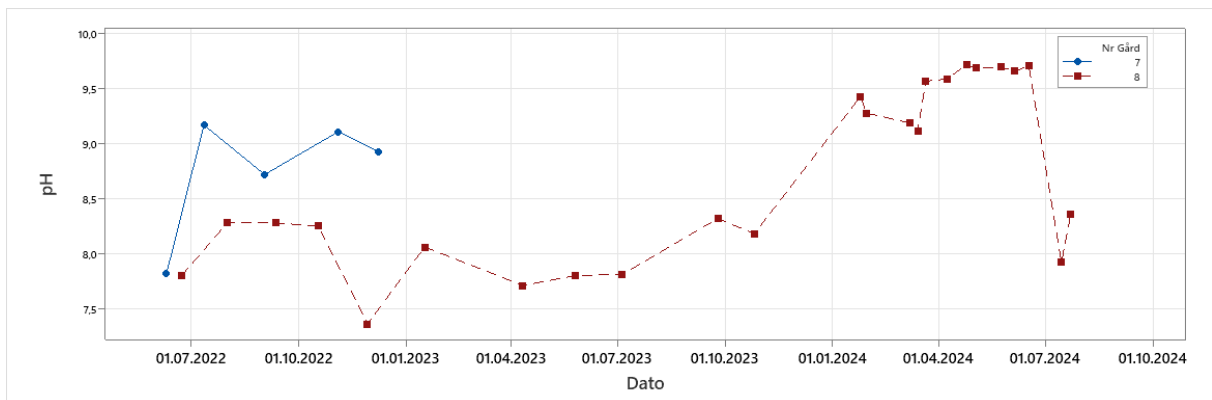
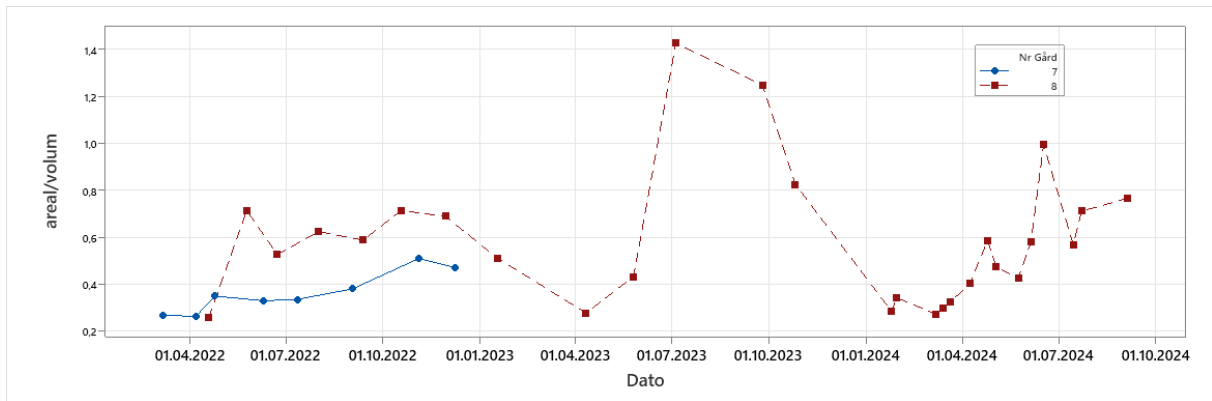
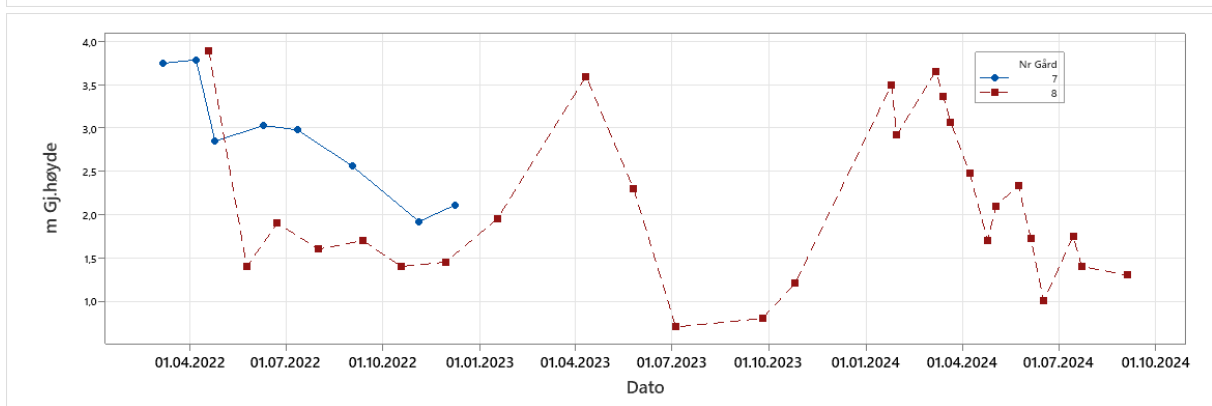
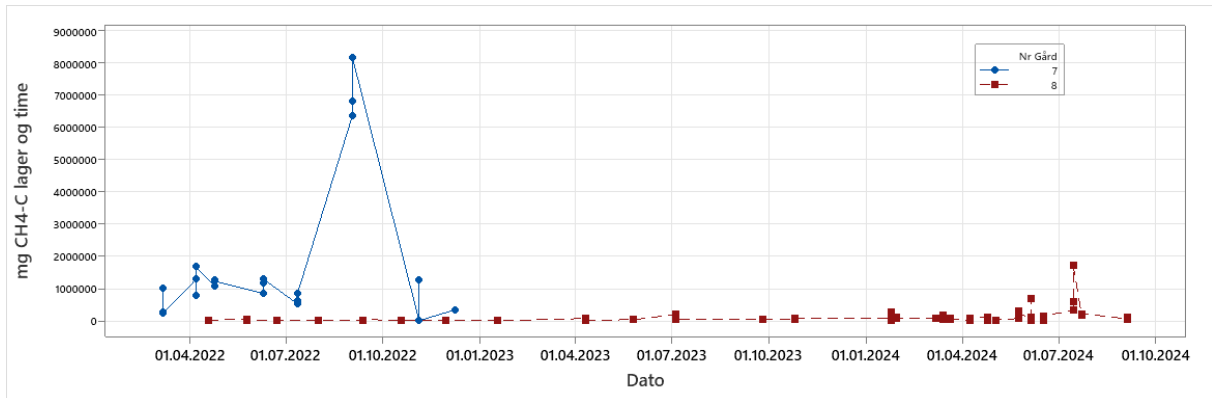


Gjødsellager 7 & 8











Norsk senter for økologisk landbruk, NORSØK er ei privat, sjølvstendig stifting.

Stiftinga er eit nasjonalt senter for tverrfagleg forskning og kunnskapsformidling for å utvikle økologisk landbruk. NORSØK skal bidra med kunnskap for eit meir berekraftig landbruk og samfunn. Fagområda er økologisk landbruk og matproduksjon, miljø og fornybar energi.

Besøks- /postadresse

Gunnars veg 6
6630 Tingvoll

Kontakt

Tlf. +47 930 09 884
E-post: post@norsok.no
www.norsok.no