

SkitGass

Klimagassutslipp fra bløtgjødsel

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



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

DATO:	RAPPORT NR.		PROSJEKT NR.:
31.12.2024	Vol 9 nr 20 2024	Åpen/Lukket (til)	2022/66637, Agros 203854
ISBN:	ISSN:	ANTALL SIDER:	ANTALL VEDLEGG:
978-82-17-215-6		Antall sider	Vedlegg

OPPDRAGSGIVER:

Oppdragsgiver

KONTAKTPERSON NORSØK:

Sissel Hansen

STIKKORD:

Lystgass, Metan, Storfe, lager,

Stikkord engelske

FAGOMRÅDE:

Landbruk, Miljø

Insert field of work

SAMMENDRAG:

Hovedmålet for prosjektet SktitGass var å identifisere muligheter til å redusere utslipp av klimagasser fra husdyrgjødsellager. Vi undersøkte gjødseltemperatur i 16 gjødsellagre og klimagassutslipp i 8 av dem. Vi fant at det er kjølig i gjødsellagrene med en årlig gjennomsnittstemperatur på 8,4 °C. Selv om sommeren så er temperaturen sjelden over 15°C. Gjødsler er varmest i august og hadde en gjennomsnittstemperatur på 13,8°C i 2022. Vi fant at det var stor variasjon mellom gjødsellagre i vanninnhold og skorpedannelse. Gjennomsnittlig innhold av organisk materiale (VS) i gjødsler 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. Median verdi for alle målinger var 4,1mg CH₄-C per kg VS og time. Det var lavest utslipp av metan per kg VS (1,1-1,2 mg CH₄-C) der det var høy VS% i selve bløtgjødsler (uten skorpe eller under skorpa) eller det var tjuk, porøs skorpe. Kalk kan muligens spille en rolle her.

Per kg VS var det ikke lavere utslipp fra biorest enn lager med ubehandlet gjødsel. Tilsetning av fersk gjødsel eller annet energirik 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 trengs.

Tiltak for reduserte utslipp fra gjødsellager: Lav temperatur i gjødsellageret; Tak over gjødsellager og 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 luft nedenfra.

SUMMARY:

LAND: NORGE	Land
FYLKE: MØRE OG ROMSDAL	Fylke
KOMMUNE: TINGVOLL	Kommune

GODKJENT	PROSEKTLER
Turid Strøm	Sissel Hansen
NAVN	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 klimagasser fra 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 til nå har kommet 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 samarbeide 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 for ved Bjørn Skarbø og Jon Geirmund Li for hjelp med å finne aktuelle gårder, gode kommentarer underveis og for felles Fjøs møte og Statsforvalteren sin landbruksavdeling i Møre og Romsdal, 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 målingene 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 og andre gårdbrukere som har vært med i prosjektet, for registreringer i deres gjødsellager og for svar på våre mange spørsmål. På seksten gårder har vi registrert temperatur i gjødselkummen og på åtte av disse, gassutslipp i tillegg.

Tingvoll, 31.12.24

Sissel Hansen

Innhold

1	Innledning.....	5
1.1	Bakgrunn for SkitGass	5
1.2	Gassdannelse og utslipp fra bløtgjødsellager	6
1.2.1	Metan (CH ₄)	6
1.2.2	Lystgass (N ₂ O)	7
1.3	Formål	7
2	Materiell og metode	8
2.1	Gjødsellager	8
2.2	Registreringer.....	10
2.2.1	Klimadata	10
2.2.2	Gjødsel	11
2.2.3	Klimagasser	12
2.3	Statistikk.....	17
3	Resultat	18
3.1	Temperatur	18
3.2	Gjødsellegenskaper.....	22
3.3	Klimagassutslipp.....	24
3.3.1	Lystgass	26
3.3.2	Metan	30
4	Diskusjon eget arbeid.....	38
4.1	Metodiske utfordringer.....	38
4.2	Våre funn.....	39
4.2.1	Temperatur	39
4.2.2	Klimagasser	40
4.3	Åpne arbeidsmøte.....	45
4.3.1	Fjøsmøte	45
4.3.2	Møte og Webinar landbruksdirektoratet med diskusjon	45
5	Anbefalte tiltak for reduserte klimagassutslipp fra gjødsellager i Danmark og Sverige	46
5.1	Danmark.....	46
	Biogassanlegg	46
	Forsuring med svovelsyre	46
	Oppsamling og fakling av gass.....	47
5.2	Sverige.....	47

6	Tiltak og anbefalinger for reduserte klimagassutslipp fra bløtgjødsellager fra storfe.....	49
6.1	Generelle anbefalinger	49
6.2	Mulige tiltak som trenger utprøving før de anbefales.....	50
7	Andre forskningsbehov	52
8	Konklusjon.....	54
9	Referanser	55
10	Vedlegg.....	59
10.1	Vedlegg 1.....	59
10.1.1	Gårder med kjeller, to gårder	59
10.1.2	Gårder med kum med PVC-tak, ny gjødsel under skorpa, to gårder.....	69
10.1.3	Gårder med kum med biorest, ny gjødsel ovenfra, to gårder	74

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

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 gjødsla

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

IPCC: International Panel on Climate Change = FNs klimapanel

N₂O: lystgass

NH₃: ammoniakk

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

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

NLR: Norsk landbruksrådgiving

NO_x: nitrogenoksidforbindelser

VS: Volatile solids som er det samme som organisk materiale i gjødsla. 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 tusen 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 vil ikke biogass være 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 så er det viktig å dokumentere utslipp fra ulike lager for husdyrgjødsel og biorest. En stor utfordring både for estimatene i Klimakur 2030 (Miljødirektoratet 2020) og i det nasjonale utslippsregnskapet (Miljødirektoratet m.fl., 2019) er få målinger under norske forhold på 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% storfegjødsel lagret som bløtgjødsel i gjødselkjeller, 27% som bløtgjødsel i utendørslager og 8% var lagret på annen måte (Kolle og 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 til 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 gjødseleffekt 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 vil det dannes ei naturlig skorpe som består av faste bestanddeler av gjødsla fordi de faste partiklene er lettere enn den flytende delen og 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 vil øke med økende tørrstoffinnhold i gjødsla, minkende overflate i forhold til gjødselvolum, økende andel fiber i fôrrasjonen og fordamping, og den vil minke 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 minker (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 7-8, 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 CH₄ utslipp på grunn av skorpedannelse oppveies av økte N₂O utslipp, og om CH₄ samlet under skorpa frigjøres når skorpa brytes.

1.2.2 Lystgass (N₂O)

Lystgass dannes når mineralnitrogen (NO₃-N, NH₄-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 N₂O-N ved naturlig flytedekke/skorpe og at det ikke blir utslipp av N₂O 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 fra 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.

2 Materiell og metode

2.1 Gjødseellager

Alle gårdene i dette prosjektet har melkeku og gjødsla lagres som bløtgjødsel. Gårdene ligger Møre og Romsdal og Trøndelag. Vi registrerte temperatur i tre lager fra hver av følgende typer bløtgjødseellager 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
Lager-type	1	2	3	3	5	5	6	6
Forkortelse	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 høst 23
Melk ¹	6842 kg	5526 kg	8000 kg	7800 kg	9500 kg	9020 kg	kg	8375 kg

Kraftfôr²	29 kg	35 kg	24 kg	35 kg	31 kg	35 kg	kg	22 kg
-----------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----	-------

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

Diverse:

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 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 gjødsla 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 gjødsla i perioder, men betraktelig mindre enn i gjødsellager 6.

Gjødsellager 4. Gjødselkummen var ofte full. Gårdbruker tappet ut lettflytende gjødsel for til andre lager. Det var høy tørrstoffprosent og tykk skorpe som var tørr i overflata i tørre i 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 bløtgjødsla. 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 gjødsla 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 grisegjødsel som substrat. Her ble det i løpet av måleperioden ved et tilfelle tilsatt et ureaprodukt som er et restprodukt fra produksjon av omega 3 fettsyrer i fiskeindustrien. Urea blir brukt til å oppkonsentrere omega-3 fettsyrer. Innholdet varierer noe, men inneholder rundt 20,5% N og 62% tørrstoff. Tørrstoffet inneholder typisk en 15-20 % olje, da i form av etyl estere og litt monoglyserider. Resten av tørrstoffet er stort sett urea. Det var et nedkjølingssteg for å kjøle ned gjødsla fra biogassreaktor til lager for biorest.

Gjødsellager 8. Gjødsellager for biorest på Tingvoll Gard. Det er brukt en mindre forsøksreaktor for biogassfermentering. Systemet har vært under utvikling i store deler av måleperioden. Det var et nedkjølingssteg for å kjøle ned gjødsla fra biogassreaktor til lager for biorest. I perioder der det bare var ubehandlet gjødsel i gjødsellageret fordi biogassreaktor ikke var i drift er lageret karakterisert som KTtopp.

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 gjødsla 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

2.2 Registreringer

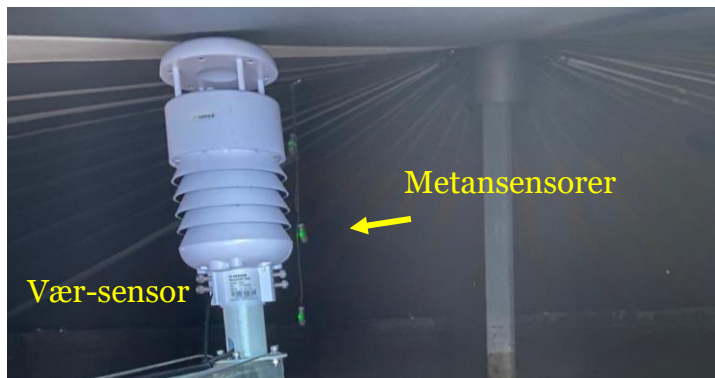
2.2.1 Klimadata

Temperatur ble kontinuerlig registrert i uteluft 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 på en del av gårdene perioder hvor temperaturen ikke ble registrert. Det var mest fullstendige data for året 2022. Statistiske sammenligninger ble derfor gjort for dette året.



Bilde 1. Festing av sensorer til kjetting for temperaturregistreringer på 0,5 og 1 meters dyp. 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 bløtgjødsellager.



Bilde 2. Vær-sensor og metansensorer ble plassert rett under taket på gjødselkummen på Tingvoll gard. Foto V. Botterli, NORSØK

2.2.2 Gjødsel

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 x) 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 igjen automatisk. I dype gjødsellager 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 utseende 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, Sverige 3 steder (Bilde x).

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 bare var tynn skorpe og det var lett å nå til å få målt, så brukte vi et vanlig metermål til registrering av skorpetykkelse. Dersom skorpa var ca 7 cm eller tykkere tok vi skorpeprøve, og bestemte tørrstoff og glødetap i den. Fordi skorpa kunne være ganske heterogen, og varierte ulike steder i gjødsellageret og fra topp til bunn i skorpa, og av og til over en meter tykk, 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 x) 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 i en anslått gjennomsnittlig volumvekt på skorpe på 1,05 kg/dm³ skorpe basert på gjennomsnitt av våre registreringer.

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

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

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.

I forbindelse med utprøving av metansensorer prøvde vi ut en laser for å måle avstand til gjødsellager (Optisk nivå sensor O1D300, [O1D300 - Optisk nivå sensor - ifm](#)). Laseren hadde en nøyaktighet 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 3. Fra venstre: gjødselprøvetaker i bruk og i nærbilde, målestav til å bestemme skorpe tykkelse, skorpespade, laser for å bestemme avstand til gjødseloverflate. Foto NORSØK

2.2.3 Klimagasser

2.2.3.1 Kammer metode kombinert med gasskromatograf

Vi prøvde å få tatt 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 så valgte vi å ta 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 får å måle fluksen mellom gjødsel og luft. Kamrene er laget i aluminium, har to flytepontonger på hver side og en gasstett slange i teflon er koblet på toppen av kammeret. I andre enden av teflonslangen er en treveis-ventil festet til en 20ml 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 henholdsvis 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 ta prøver fra kammeret ved 0; 2,5; 5; 7,5;10;20; 30 og 40 minutt etter at kammeret var senket forsiktig ned på gjødsla. Etter hvert kuttet vi ut siste måling på 40 minutt. 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 og innholdet fylt i evakuerte 12 ml prøveglass med 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. 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 minutt, 10-30 minutt, 0-20 minutt og 0-30 minutt 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 på noen gassprøver i forkant av gassprøvetaking. Usannsynlige verdier ble derfor tatt bort før beregning.

Skorper gir noen metodiske utfordringer med uttak av gassprøver. Ved tykk skorpe vil kammeret ligge oppå skorpa og ikke stikke hull på den selv om vi presser kammeret ned i skorpa. Eventuell gass under skorpa vil da ikke bli frigjort før gjødse lageret røres om og skorpa brytes. Fordi skorpa som regel er ru, er det også vanskelig å unngå gliper mellom kammer og skorpe. Dette kan gi en luftveksling mellom kammer og omgivelser og dermed en risiko for lavere registrerte utslipp gjennom skorpa enn det som er reelt. For å bøte på det siste lagde vi et kammer med en kappe rundt for å hindre gassutveksling som vi brukte der det var mulig å få kammeret til å flyte oppå skorpa. Ved tynn skorpe eller hinne på gjødsla som ikke bar kammeret, fikk vi en skorsteineffekt 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 oppå 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 registrering straks kammeret settes ned, skal i prinsippet være det samme. En høyere

konsentrasjon i kammeret straks det ble satt ned enn utenfor, tok vi som bekreftelse på frigjøring av gass under skorpe/hinne som følge av at vi lagde hull på den. Vi får da en massefluks som i motsetning til diffuse gassutslipp kommer som en rask frigjøring av gass når bobler med gass brister.

Vi hadde ikke data på hvor mye organisk stoff som ble tilført gjødsellagrene via gjødsel, fôrrester, strø og annet og kunne derfor ikke beregne MCF (Methane Conversion Factor) som beregnes som summen av metanutslipp oppgitt som $\text{CH}_4\text{-C}$ per kg organisk stoff som tilføres gjødsellageret (IPCC, 2006) og divideres med B_0 (maksimal kapasitet for metanproduksjon).

Ved beregning av oppvarmingseffekt i kg CO_2 -ekvivalenter brukte vi volumvekt for omregning av CO_2 -C, N_2O -C og CH_4 -C til CO_2 , N_2O og CH_4 . Basert på IPCC (2019) brukte vi en omregningsfaktor fra N_2O til CO_2 -ekvivalenter på 265 og fra CH_4 til CO_2 -ekvivalenter på 28.



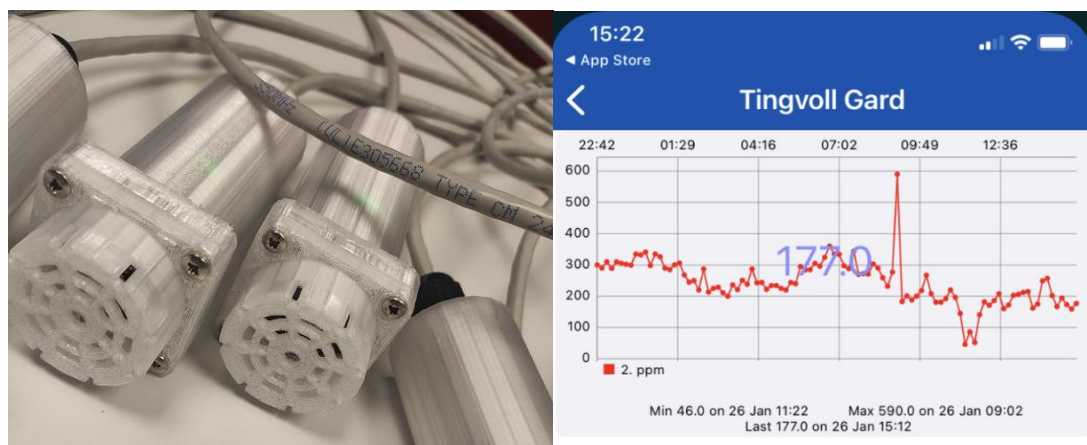
Bilde: Uttak av gassprøver ved hjelp av kammer på gjødsellager. I de to bildene til venstre så har kammeret skjært gjennom overflaten, mens kammeret til høyre hviler oppå gjødselskorpa og har ei kappe rundt for å hindre gassdiffusjon. Foto: NORSØK

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 lufta over gjødsla. Kontinuerlig registrering av CH_4 konsentrasjon over gjødsla, 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. I Skitgass ønsket vi først og fremst å undersøke sammenhengen mellom temperatur i gjødsla og metankonsentrasjonen i lufta over gjødsla i lagerperioden.

En elektrokjemisk metansensor (MOS-type sensor Figaro TGS 2611-E00) ble koblet sammen med en temperatur og fuktighetssensor og testet i et kammer med kjent konsentrasjon av CH_4 i lufta ved varierende temperatur og luftfuktighet. Dette for å finne en kompensasjonsalgoritme som tillater å

korrigere målt CH₄ konsentrasjon ut fra temperatur og fuktighet. Det ble også utviklet en ekstra komponent for kommunikasjon med en sentralenhet. Sentralenheten kommuniserer også med andre sensorer. 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. Komponenthusene ble designet og produsert med 3D-printing.



Bilde 4 Komponenthus med metansensorer til venstre. Foto: M. Jakovljevic Til høyre eksempel på registrering av metankonsentrasjoner lastet ned på mobiltelefon.

Kalibreringssystemet bestod av et klimakammer, en luftfukter, en referanse gassanalysator (Picarro), et metandoseringsystem og et LabView-program for datainnsamling, analyse og kalibrering. Målingene ble samlet inn over flere dager. Basert på nøyaktig konsentrasjonen 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.



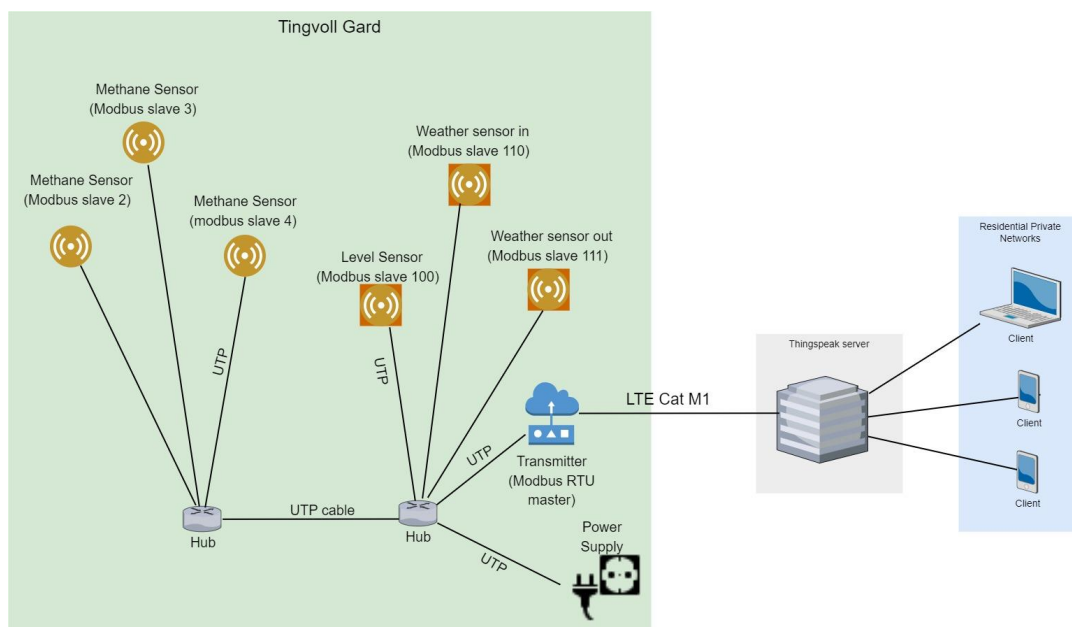
Bilde 5. System for kalibrering av metansensorer. Foto: M. Jakovljevic

Det ble laget 9 sensorer for registrering av metankonsentrasjon. Tre metansensorer ble installert i hvert av tre ulike gjødsellager. Lager 1 er gjødselkjeller med åpen forbindelse til fjøset. Det var

vanskelig å registrere metanutslipp fra gjødsellager 1 da vifte i taket sugde lufta ut gjennom ristene i fjøset. Disse var et stykke unna der det var mulig å plassere metansensorer. Vi har derfor ingen resultat dette lageret.

På gårdene med gjødselkum ble det koblet en laser som registrerer avstand til gjødseloverflaten til sentralenheten. På lager 6 har registreringene 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 ustabilt, men hyppige utkoblinger av en eller flere sensorer. Det ser ut til at elektrisk strøm mellom alle sensorene gjør systemet ustabilt, og på Tingvoll har det vært flere perioder hvor en eller flere sensorer ikke registrerer data. Også metansensorene er følsomme for det aggressive miljøet og noen har 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 GA5000 Gas Analyser

(Geotech: https://cadmus.co.uk/geotech-biogas-5000-portable-analyser?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMIsbGJ5fv-iQMV6mSRBR1dwh29EAAYAiAAEgKQG_D_BwE) 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.

2.3 Statistikk

Statistiske beregninger ble gjort med (Mintab 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 gjødsla. 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 topp av gjødsellager og bunn i de fleste gjødsellager. Gjødsellagertype ble behandlet som fast effekt og utetemperatur som tilfeldig kovariat. Ved signifikant effekt av gjødsellager brukte vi Tukey test (Tukey Pairwise comparison) for å teste forskjell mellom gjødsellager.

Det ble brukt multippel lineær regresjon, stepwise for grupper av gjødsellager og for hver gård for å identifisere hvilke faktorer som hadde sterkest effekt på skorpetykkelse, utslipp av lystgass og metan. For metan undersøkte vi lager uten bioest og brukte responsvariabel $\mu\text{g CH}_4\text{-C}$ per time og kg VS i gjødsellageret. Kontinuerlige inngangsverdier var pH, temperatur i 50 cm dybde i gjødsellageret, mengde gjødsel på lager uttrykt som kg VS under en m^2 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.

Lineær-plot med 95% konfidensintervall basert på uavhengige standardavvik, ble brukt til enkelt å identifisere signifikant forskjell mellom gjødsellager.

3 Resultat

3.1 Temperatur

Vi fant en gjennomsnittlig årstemperatur på 8,4 °C i gjødsellagrene på gårdene i dette prosjektet. I to gjødsellager var temperaturen under 7°C (6,5 og 6,6°C), mens i tre lager var gjennomsnittstemperatur 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 som oftest lavere enn lufttemperaturen ute, mens det var omvendt på høsten og vinteren. Gjødsla var også varmere på sommeren enn om vinteren, og varmest der det var minst gjødsel på lager. Varmest var gjødsla 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 er lite gjødsel på lager.

Til tross for nedkjølingssteg så var det varmere gjennomsnittstemperatur i lager med biorest enn i lager uten biorest, og det var varmere i utendørs kum enn i kjeller ($P < 0,05$) både for hele året og for de 6 varmeste månedene i gjødsellageret (mai-oktober) i 2022. Det er for ufullstendige data til at vi kunne regne statistikk på effekt av ulike typer gjødsellager i 2023, men Figur 3 viser noen av variasjonen mellom ulike lager. Tykkelse på skorpa påvirket gjødseltemperaturen både i 50 cm og 150 cm dybde slik at vi fant lavere temperatur i gjødsla med stigende skorpetykkelse ($P < 0,05$). Fordi vi ikke har skorpedata på de gårdene der vi ikke målte gass, så undersøkte vi dette i data fra de sju 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.

Forklaring forkortelser

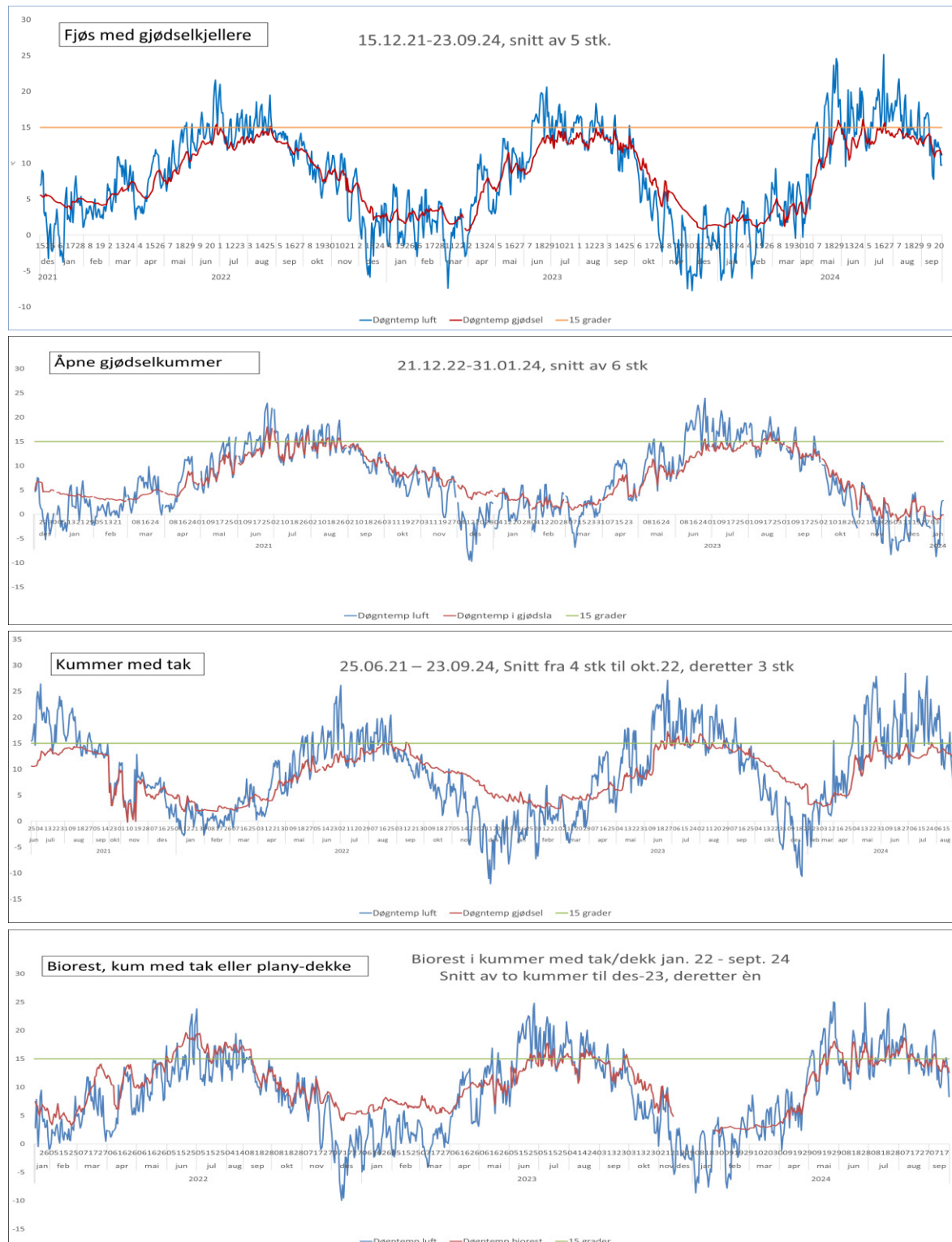
FT:	Fjøs med kjeller og tett forbindelse
FÅ:	Fjøs med kjeller og åpen forbindelse
KT_bunn	Kum med tak og tilførsel i bunn
KT_topp	Kum med tak og tilførsel fra toppen
KÅ_bunn	Åpen kum med tilførsel i bunn
KÅ_topp	Åpen kum med tilførsel fra toppen
KT_topp_biorest	Kum med tak, tilførsel fra toppen, inneholder biorest
KD_topp_bior_kugr	Kum med Plany-dekke tilførsel fra toppen, inneholder biorest fra blandet ku- og grisegjødsel + urea

Tabell 2. Gjennomsnittlig temperatur i gjødsla ulike gjødsellager i °C (gjennomsnitt for antall registreringer og gjennomsnitt for 50 og 150 cm gjødseldyp). Antall dager er antall dager hvor temperaturen er registrert i hvert av gjødslelagene summert for gjødsellagene i den aktuelle gruppa. 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 tak, ny gjødsel tilført over gjødseloverflaten; KT= Kum med tak; KÅ = Åpen kum; topp = ny gjødsel tilført ovenfra. Gj.-snitt er aritmetrisk gjennomsnitt, StAv = standardavvik; min = minimumstemperatur; maks = maksimumstemperatur for den perioden det ble gjort målinger. Perioden varierte mellom gjødsellagene (se Figur x). Gj.-snitt_{Korr} er gjennomsnitt i samme periode korrigert for variasjoner i lufttemperatur. T= Tukey test for måleperioden og Ts for 6 varmeste måneder² (p<0,05) Lik bokstav indikerer at gjennomsnittlig temperatur i gjødsellagene ikke er forskjellig fra hverandre. SoGj.-snitt_{Korr} er gjennomsnitt for 6 varmeste måneder² korrigert for lufttemperatur.

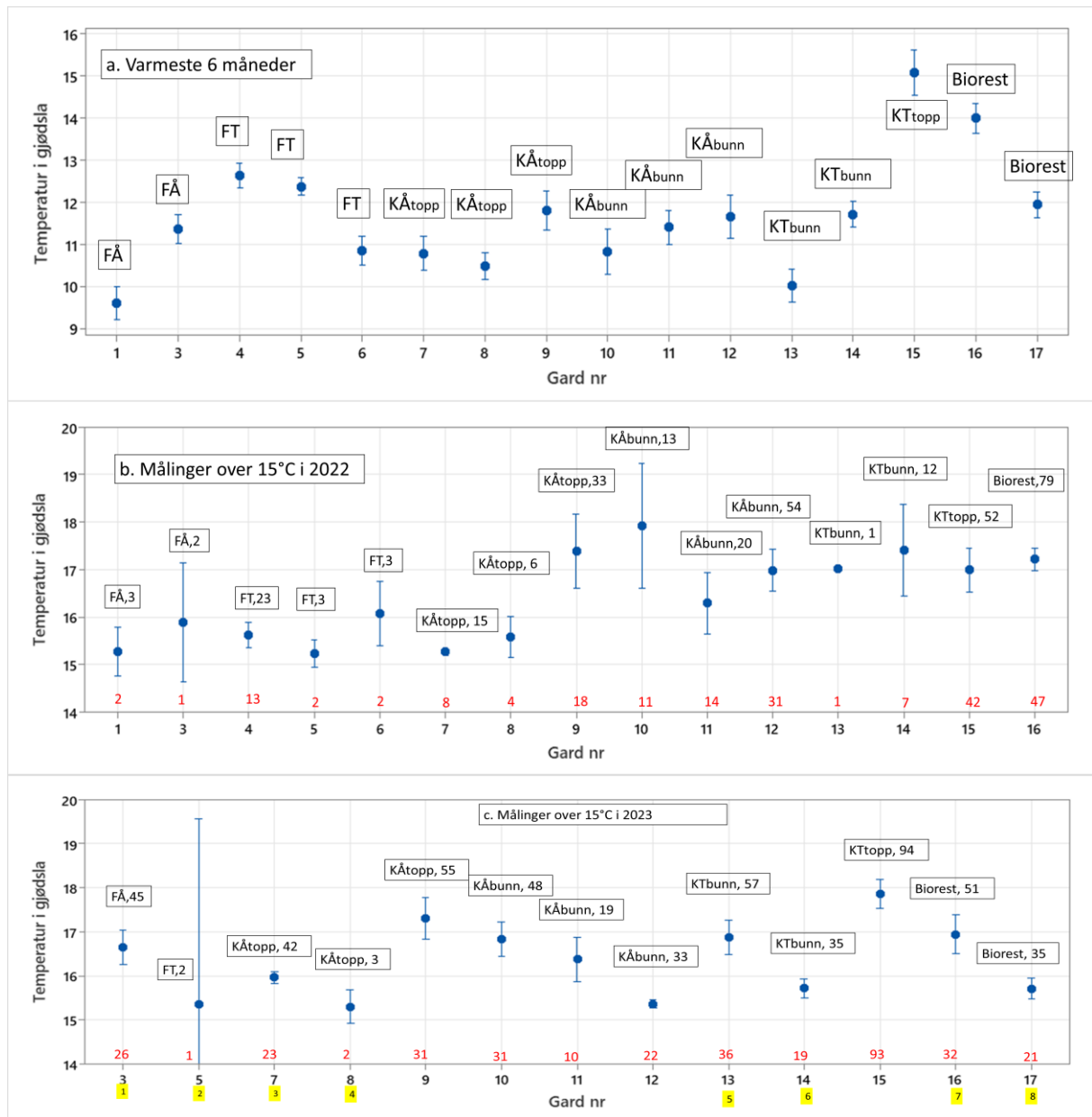
Gjødsellager	Antall dager	Antall Lager	Gj.-snitt	StAv	Min	Maks	Gj.-snitt _{Korr}	T	SoGj.-snitt _{Korr}	Ts
KD_topp_bior	673	1	11,1	4,0	1,4	20,9	10,6	a	13,8	a
KT_topp ¹	732	2	10,6	5,0	-0,3	21,0	9,6	b	12,9	b
KT_topp_bior ¹	624	1	9,5	4,9	1,8	18,7	8,9	c	12,1	c
KT_bunn	1520	2	9,1	4,3	0,5	20,9	8,8	c	10,4	f
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 lagene er samme gjødselkum (Tingvoll gard), men målingene er gjort på ulike tidspunkt).

²April, mai, juni, juli, august, september.



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

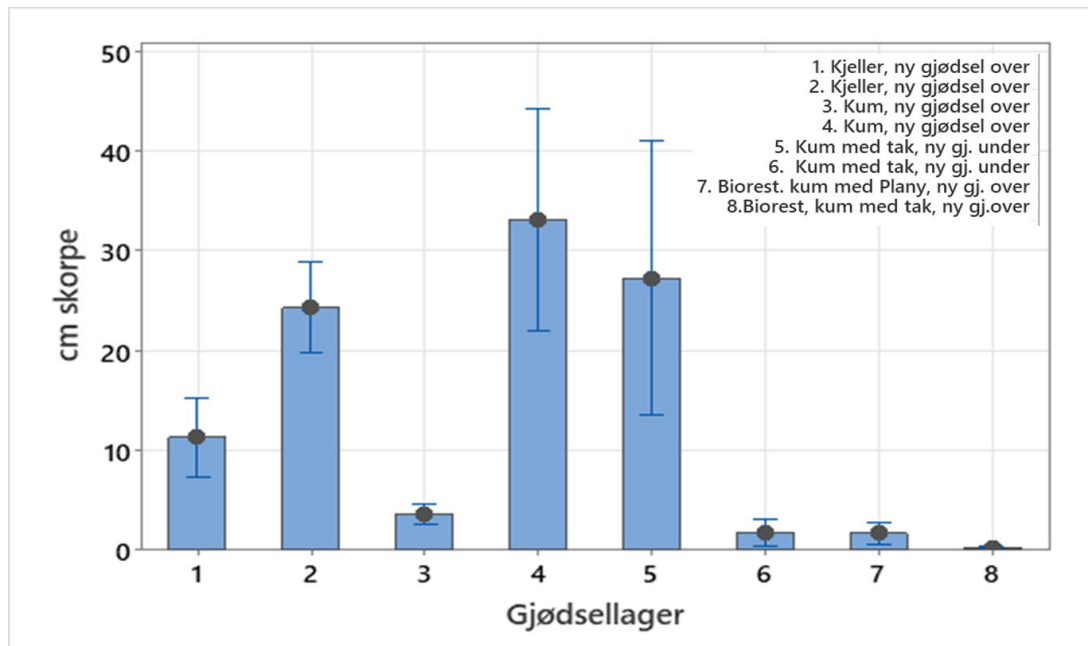


Figur 3. Gjennomsnittlig temperatur i gjødsle ulike gjødsellager i °C (gjennomsnitt for antall registreringer og gjennomsnitt for 50 og 150 cm gjødseldyp). a. For de 6 månedene i sommerhalvåret (april, mai, juni, juli, august, september) for alle år i perioden 25.06.2021 – 23.09.2024.. b. Gjennomsnitt av alle målinger over 15°C i gjødsle i året 2022. c. Gjennomsnitt av alle målinger over 15°C i gjødsle i året 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 betegnelse er antall dager hvor gjennomsnittstemperaturen er over 15°C. Forkortelsene er forklart i tabell 2. De røde numrene ved hver Gard nr 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 nummering merket gult der gassresultatene er gjengitt (3.3.1 og 3.3.2).

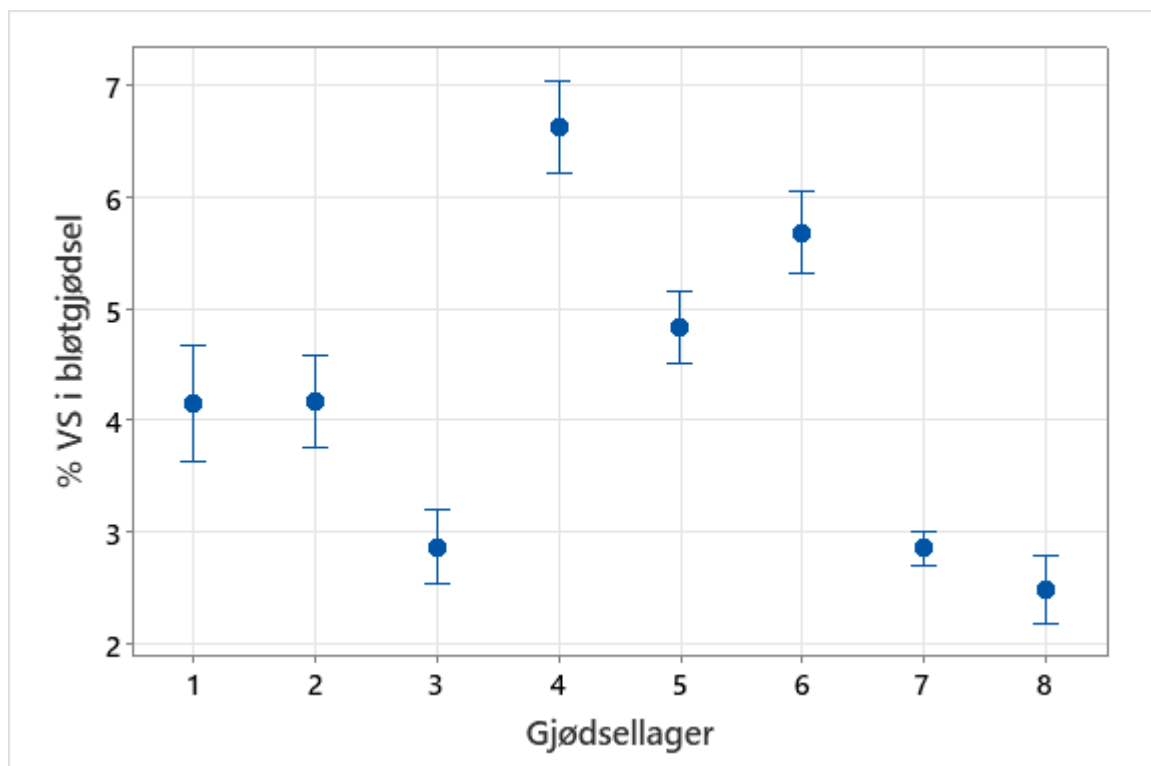
3.2 Gjødselegenskaper

I gjødsellagrene med biorest (7og 8) fant vi lite eller svært ufullstendig skorpedannelse og her var det også . For ubehandlet bløtgjødsel så 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 tykkelse på skorpa økte med mengden organisk stoff (VS) under en m² gjødseloverflate i lageret ($p < 0.001$). Denne var i sin tur et resultat av høyde på bløtgjødsel, skorpe og prosent VS i disse. Det var ulik behandling og ulike mengder vaskevann som ble tilført gjødsellagrene. Det var derfor 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 gjødsekkjeller 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 gjødsekkjeller.

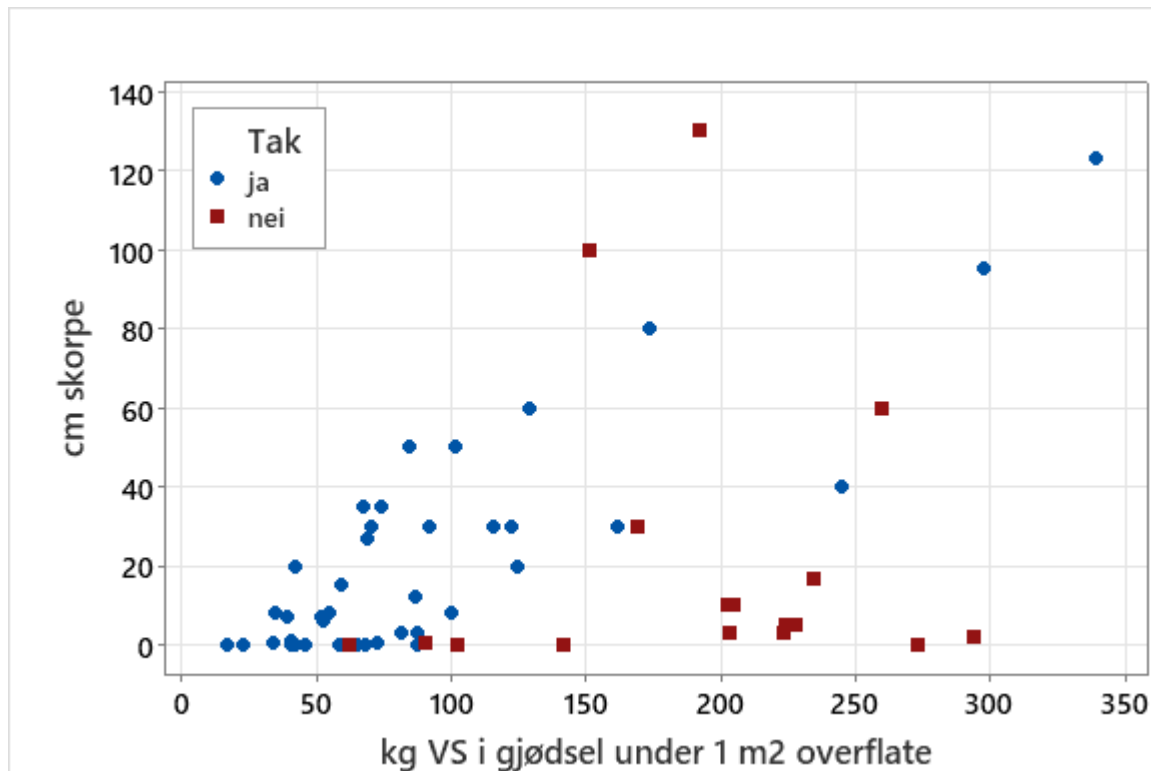
Til tross for nesten samme høyde på gjødsekkjelleren (1,9 og 1,95 m Tabell 1) var det tykkere skorpe i gjødsekkjeller 2 enn i 1. I lager 2 var det mye mer gjødsekk på lager om sommeren. Gjødsekkjeller 3 fikk tilført ny gjødsekk ovenfra, og kummen ble hyppig tømt. Her var aldri tykk skorpe, men på varme sommerdager var det noen ganger ei tett hinne eller tynn skorpe som var ganske tørr i overflata. Gjødsekkjeller 4 fikk også ny gjødsekk ovenfra og vi hadde i prinsippet forventet samme skorpedanning som i gjødsekkjeller 3. Tykk skorpe i gjødsekkjeller 4 skyldes antakelig at lettflytende gjødsekk ble sugd opp og flyttet fra denne kummen til et annet gjødsekkjeller uten at gjødsla ble rørt opp. I perioder når kummen var full ble det ikke tilført ny gjødsekk. Det var et høyt innhold av tørrstoff i gjødsla med et gjennomsnittlig innhold av VS på 6,6%. Overgangen mellom skorpe og bløtgjødsel var diffus. I gjødsekkjeller 5 ble ny gjødsekk 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 av VS i gjødsla på 4,8%. Gjødsekkjeller 6 hadde ganske høyt tørrstoffinnhold i gjødsla (VS=5,7%, Figur 5) og fikk tilført nye gjødsekk i bunnen, men det var lite skorpedannelse. Skorpe observerte vi bare på om vinteren når gjødsla var delvis frosset. I stedet var gjødsla full av bobler (bilde x kommer bilde her). Årsaken til disse boblene er antakelig at gårdbrukeren har tilført en type svært finmalt flytende kalk, men vi kjenner ikke hele årsakssammenhengen her da også gård 3 har tilført denne kalken, og her er det mye færre bobler. Også en av gårdene hvor vi bare måler temperatur tilsetter regelmessig flytende kalk uten at det har ført til sterk bobledannelse.



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



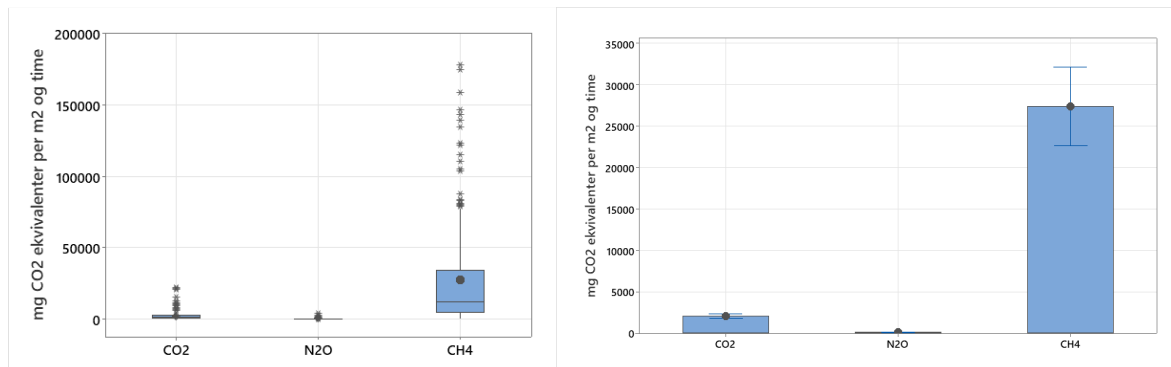
Figur 5. Prosent organisk stoff (% VS) i bløtgjødsel som ligger under skorpa i ulike gjødsellager for bløtgjødsel. Loddrett linje indikerer 95% konfidensintervall Samme nummer på gjødsellager som i Figur 4.



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

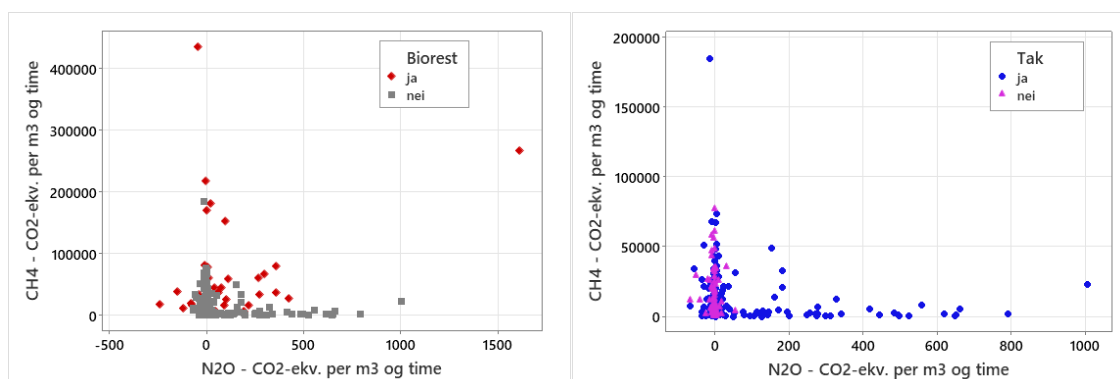
3.3 Klimagassutslipp

Metan var den gassen som betydde mest for utslipp av klimagasser fra lager for bløtgjødsel (Figur 7 og Tabell 3). Det var store variasjon i utslipp av CH₄, N₂O og CO₂ både gjennom sesongen og mellom ulike lager (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. Noe som 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 (CO₂), lystgass (N₂O) og metan (CH₄) registrert ved kammermetoden og oppgitt som mg CO₂ ekvivalenter per m² gjødseloverflate og time. Grafen til venstre viser median (strek), gjennomsnitt (svart prikk) og 25 og 75% kvartiler. Fire verdier for metan mellom 300000 og 500000 vises ikke. Grafen til høyre viser gjennomsnitt. Loddrett linje indikerer 95% konfidensintervall. Beregning av CO₂ 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 så var det i de fleste tilfelle relativt små utslipp av metan når utslippet av N₂O var større enn 200 g CO₂ ekvivalenter per m³ gjødsel og time, men for de aller fleste uttak betydde likevel utslippet av lystgass lite i forholdet til utslippet av metan (Figur 8).



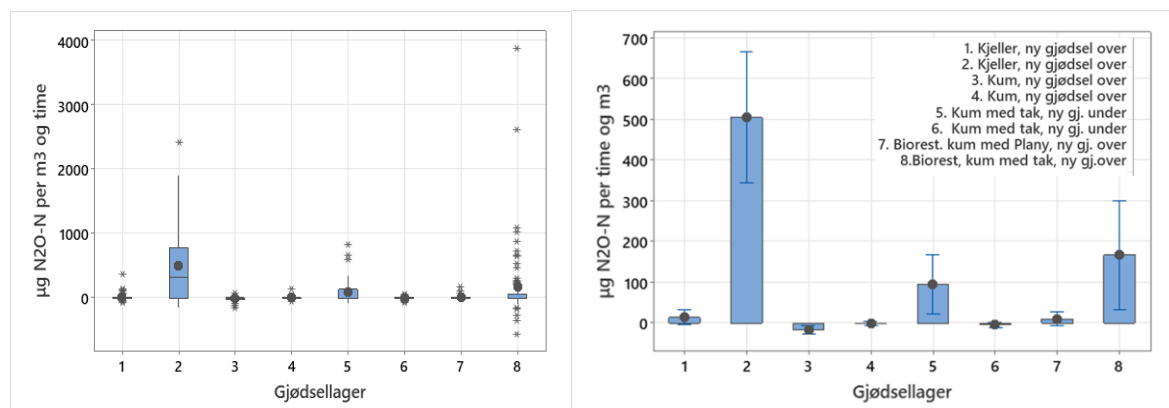
Figur 8. Utslipp av metan (CH₄) versus utslipp av lystgass (N₂O) omregnet til mg CO₂-ekvivalenter per time og m³ gjødsel omregnet til 6% tørrstoff. Hvert punkt representerer et uttak som er en registrering av utslippshastighet med gassprøver fra kammer basert på en serie med gassprøver (detaljer i 2.2.2.1). Det er tre uttak fra samme gjødsellager og dato. Grafen til venstre er basert på uttak fra alle gjødsellager. Det er seks gjødsellager uten biorest og to med. Grafen til høyre er fra prøver fra gjødsellager uten biorest. Gjødsellager med tak er enten en gjødselkjeller eller en kum med PVC-tak. Det er fire gjødsellager 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 Figur 8 og gjødsellager Figur 9.

Gass	Gjødsellager	Antall	Median	25% kvartil	75% kvartil	Mean	Min.	Max.
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 Lystgass

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 da gjødsellageret ikke ble tømt før nærmere høsten (vedlegg). Fra et av lagrene med biorest var det perioder med utslipp av lystgass, men ikke i det andre. I lageret der vi fant lystgassutslipp ble det av og til tilført fersk husdyrgjødsel.



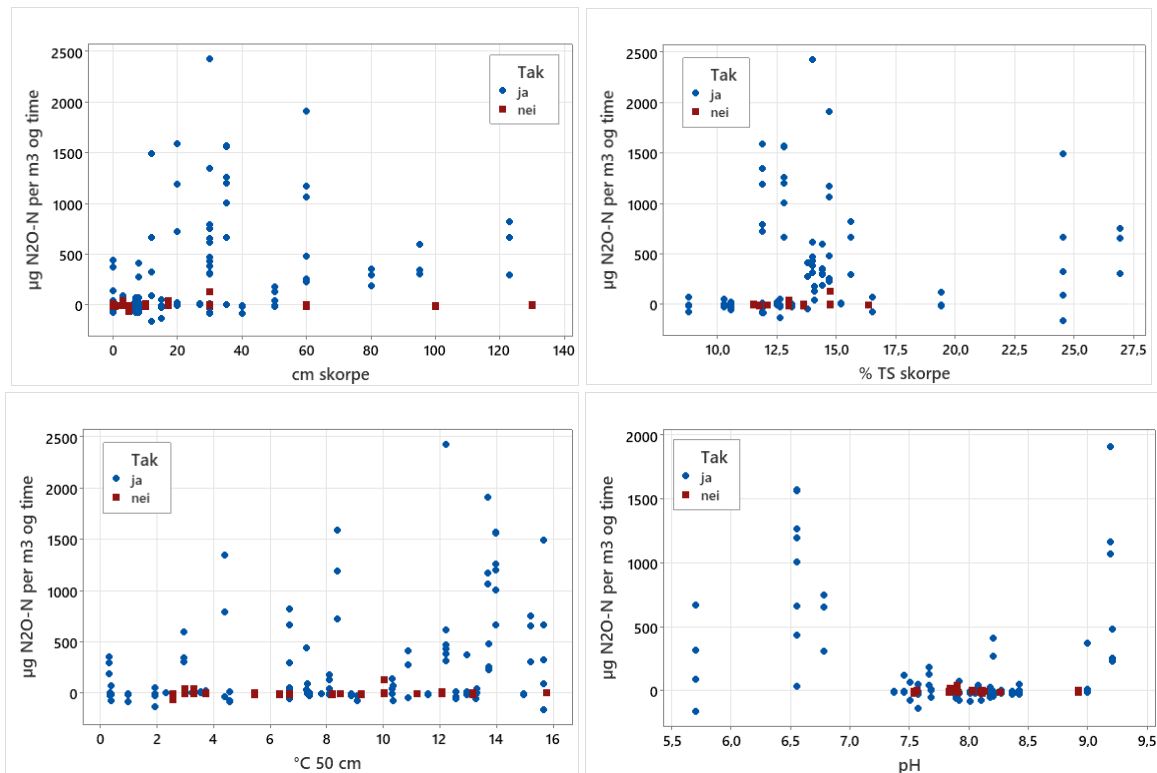
Figur 9. Utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$) per time og m^3 gjødsel omregnet til 6% tørrstoff fra ulike gjødsellagre for bløtgjødsel. Grafen til venstre viser median (strek), gjennomsnitt (svart prikk) og 25 og 75% kvartiler. Grafen til høyre viser gjennomsnitt. Loddrett linje indikerer 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 målinger fra de gjødsellagrene som hadde over 10 cm skorpe (gjødsellager 1,2,4 og 5) fant vi at lystgassutslipp økte med både skorpetykkelse og temperatur i gjødsel, mens den sank med stigende pH og tørrstoffprosent i skorpa. Det var også høyere lystgassutslipp på de tre gjødsellagrene med tak, enn på lageret uten (nr 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 regresjonsberegningen. Det skyldes nok at vi manglet TS prøver fra tynn og fuktig skorpe. Det var høye lystgassutslipp både ved pH under 7 og ved pH over 9 (Figur 10).

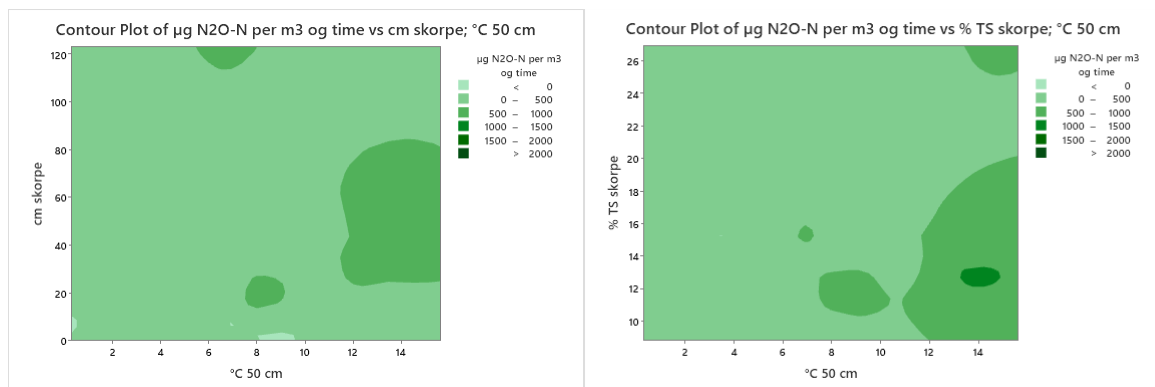
Tabell 4. Effekt av ulike faktorer på utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$ per m^3 og time) fra gjødsellager med skorpe (1,2,4 og 5) analysert med multipl lineær regresjon ($R^2 = 54\%$). Gjødsellager er forklart i figur 9..

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1284	481	2,67	0,009	
% TS skorpe	-41,1	12,3	-3,35	0,001	2,38
pH	-137,1	50,0	-2,74	0,008	1,51
cm skorpe	3,80	1,19	3,19	0,002	1,66
°C 50 cm	68,71	9,22	7,45	0,000	1,74

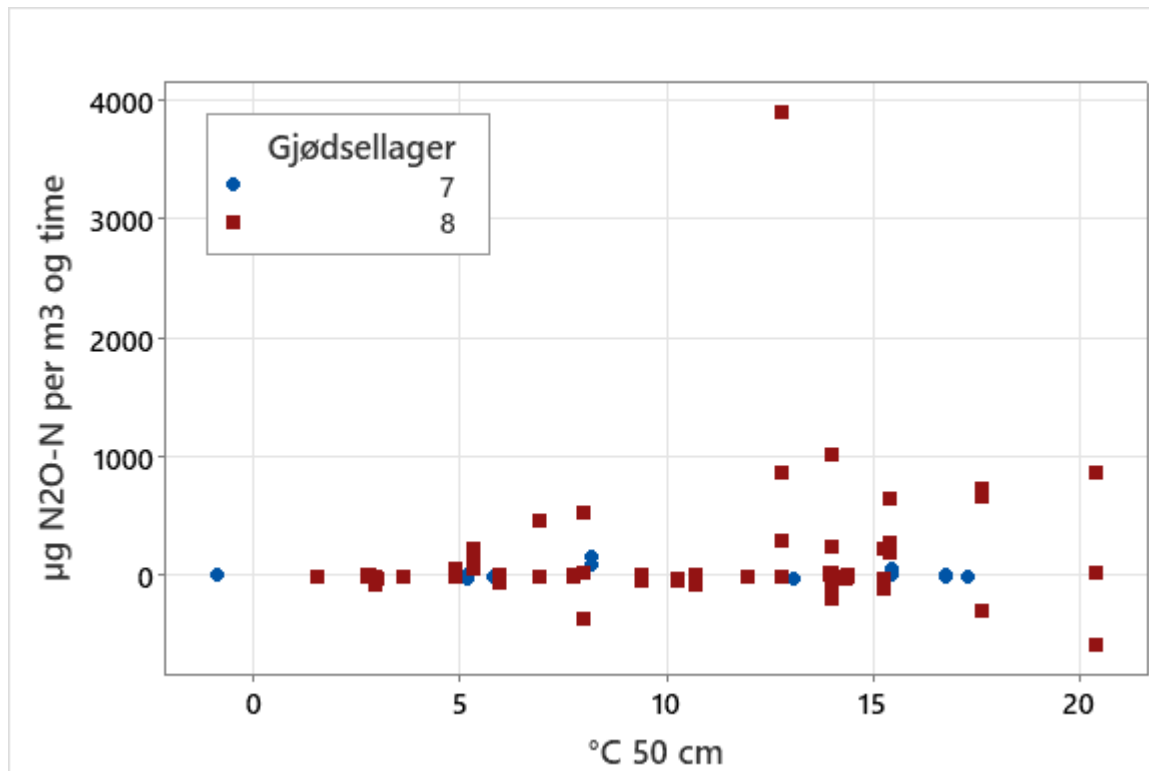
Tak, nei	-512	101	-5,09	0,000	1,75
----------	------	-----	-------	-------	------



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



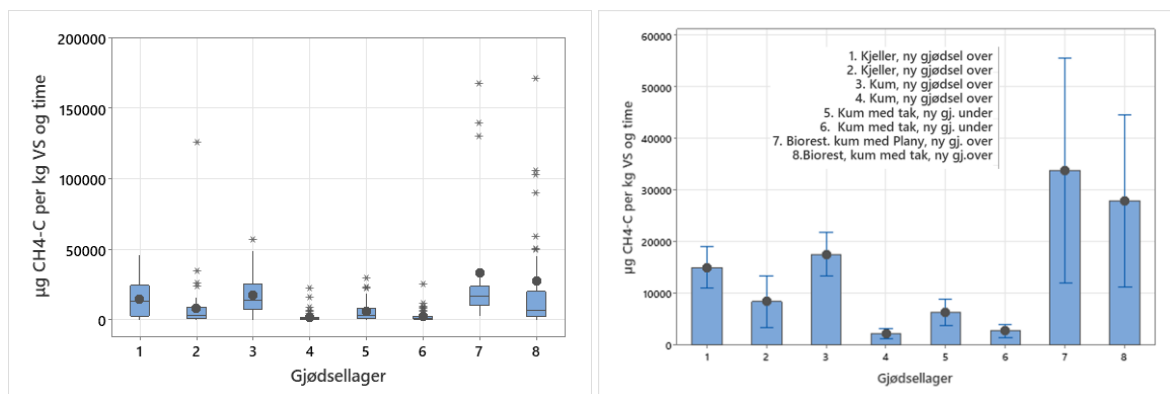
Figur 12. Utslipp av lystgass ($\mu\text{g N}_2\text{O-N}$) per time og m^3 gjødsel omregnet til 6% tørrstoff fra to gjødsellager med bioest. Hvert punkt representerer et uttak. Forklaring av uttak Figur 8 og gjødsellager Figur 9.

3.3.2 Metan

Det var store variasjoner i utslipp av metan både mellom gjødsellager (Figur 13 og Tabell 5) og gjennom året (Figur 14 og Figur 16). Det var lave utslipp av metan der det var tjukkest 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 tjukkeste skorpene var det også mest gjødsel på lager og vi fant også at utslippene av metan per kg organisk stoff sank med stigende mengde gjødsel på gjødsellageret ($\text{kg organisk stoff per m}^2$ gjødseloverflate, VSm^2) og økende konsentrasjon av organisk materiale (%VS) i bløtgjødsel under skorpa (Figur 15). I en stepwise multipl regressjon med $\mu\text{g CH}_4\text{-C}$ per time og kg VS i gjødsellageret som responsvariabel ($R^2=47\%$) var det signifikant effekt av tidspunkt målingen ble gjort på (Dato, $p>0.001$). Det var en tendens til at både stigende %VS i bløtgjødsel og bruk av brønnvann av reduserte utslipp av metan ($p=0,06$ for begge). Dersom vi ikke hadde med bruk av brønnvann i modellen så ble utslaget for %VS i bløtgjødsel signifikant ($p<0,001$).

Økende skorpetykkelse med mengde gjødsel på lager og at temperaturen holder seg lavere om sommeren når det er mye gjødsel på lager er sannsynlige forklaringer her. For gjødsellager 1, 2 og 5 var det skorpetykkelse som betydde mest for utslippet av $\text{CH}_4\text{-C}$ ($p < 0,05_{\text{lager 1\&2}} - p<0,01_{\text{lager 5}}$). Fra

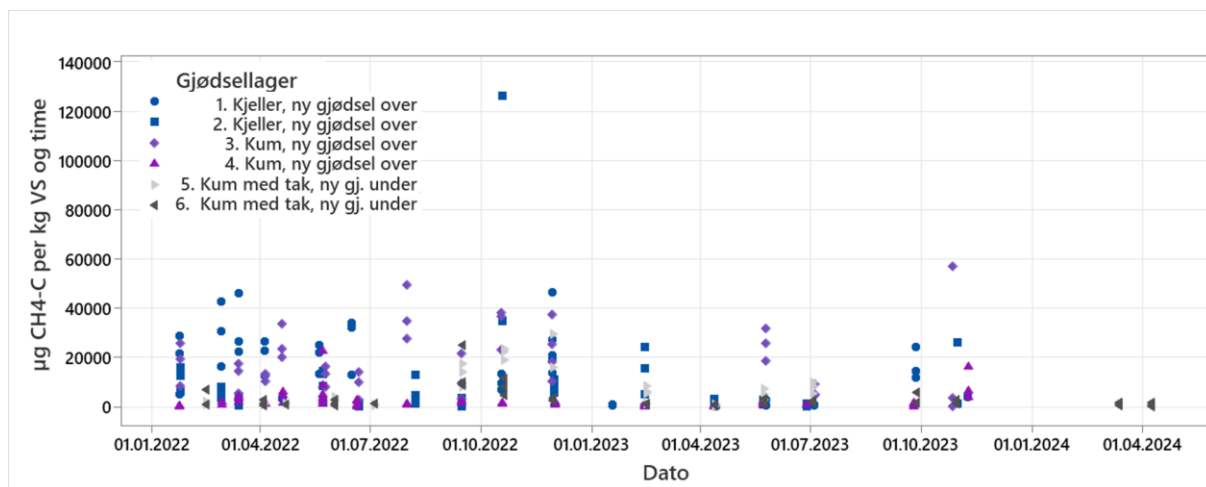
gjødse lager 4 var metanutslippene mye lavere enn for gjennomsnittet av gjødse lagre (Figur 13;14;15 og Tabell 5), og det var ingen sammenheng mellom skorpe tykkelse og metanutslipp fra dette gjødse lageret. I gjødse lager 6 var det ikke skorpe, men bobler og med ett unntak (16.09.2022) små utslipp (Figur 14 og Vedlegg 9.1.3). Det sammenfalt med tilførsel av mye gjødse l fra et ungdyrfjøs i forkant. Temperatur og pH gav ikke signifikante utslag på noen av disse 6 gjødse lagrene, ikke innafor hvert lager, og ikke samla. Heller ikke i gjødse lagrene for biorest (7 og 8) var det signifikant utslag for temperatur eller pH. Utslippene fra gjødse lager 7 var stort sett små unntatt 2.09.22 (Figur 16 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 gjødse lager 8 ble de høyeste utslippene registrert sommeren 2024 da det ble tilført en del ubehandlet bløtgjødse l til gjødse lageret og det sammenfalt med ganske høy temperatur (Figur 16 og vedlegg 9.1.4).



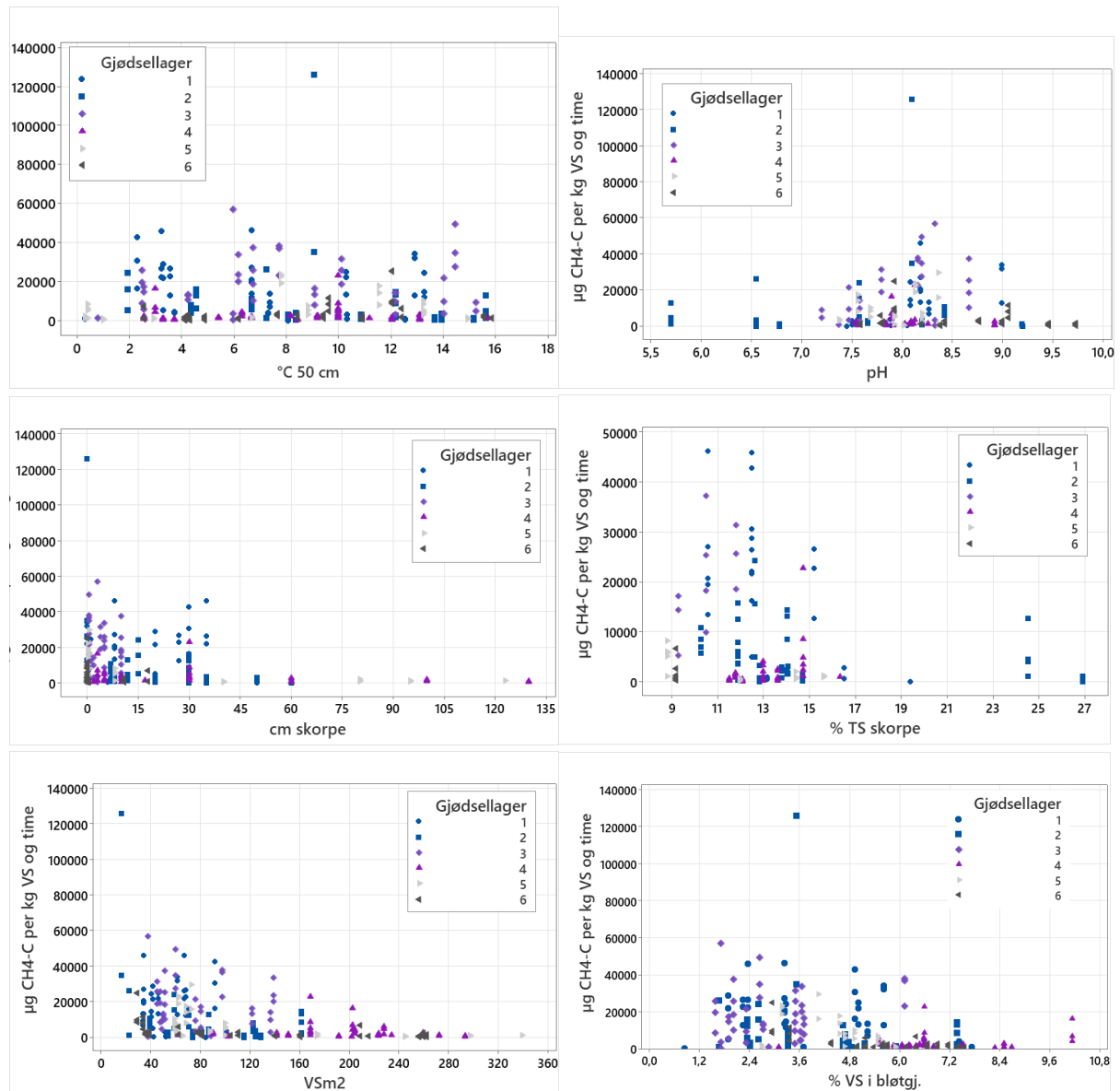
Figur 13. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per time og kg organisk stoff i gjødsla (VS) fra ulike gjødse lagre. Grafen til venstre viser median (strek), gjennomsnitt (svart prikk) og 25 og 75% kvartiler. To høye verdier for gjødse lager 8 mellom 300000 og 500000 vises ikke. Grafen til høyre 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. Antall

Tabell 5. Utslipp av metan (CH_4) registrert ved kammermetoden og oppgitt som $\mu\text{g CH}_4\text{-C per kg VS og time}$, $\text{mg CH}_4\text{-C per m}^3$ gjødsel omregnet til 6% tørrstoff og time, $\text{g CH}_4\text{-C per m}^3$ gjødsel omregnet til 6% tørrstoff og døgn og $\text{mg CH}_4\text{ per m}^3$ 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. Resultatene 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.	Max.
$\mu\text{g CH}_4\text{-C per kg VS og time}$	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
$\text{mg CH}_4\text{-C per m}^3$ 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	116,1	5818
	8	73	223	92	649	726	13,1	11642
$\text{g CH}_4\text{-C per m}^3$ 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
$\text{mg CH}_4\text{ per m}^3$ 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	154,9	7757
	7*	18	725	449	1002	741	154,9	1557
	8	73	297	123	865	968	17,5	15523

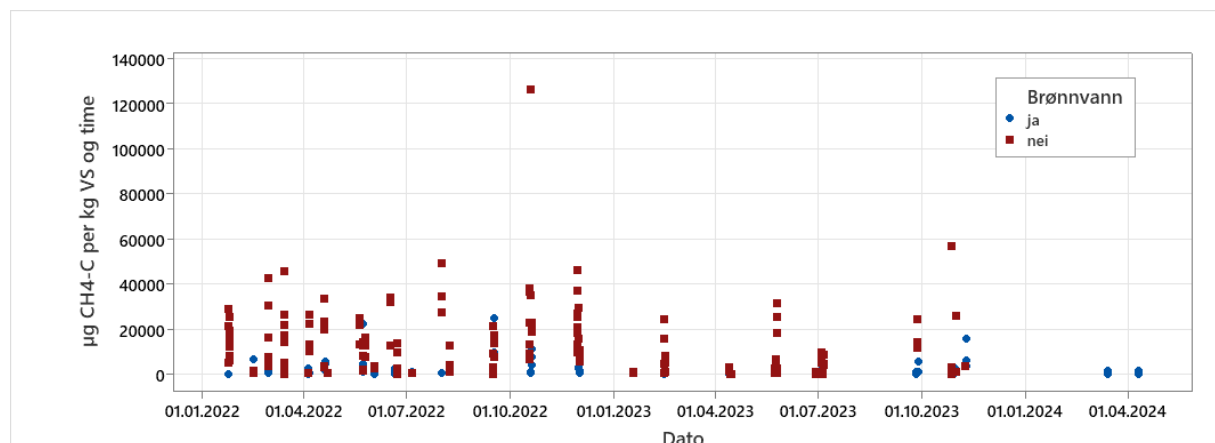


Figur 14. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre uten biorest versus dato. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se Figur 8.

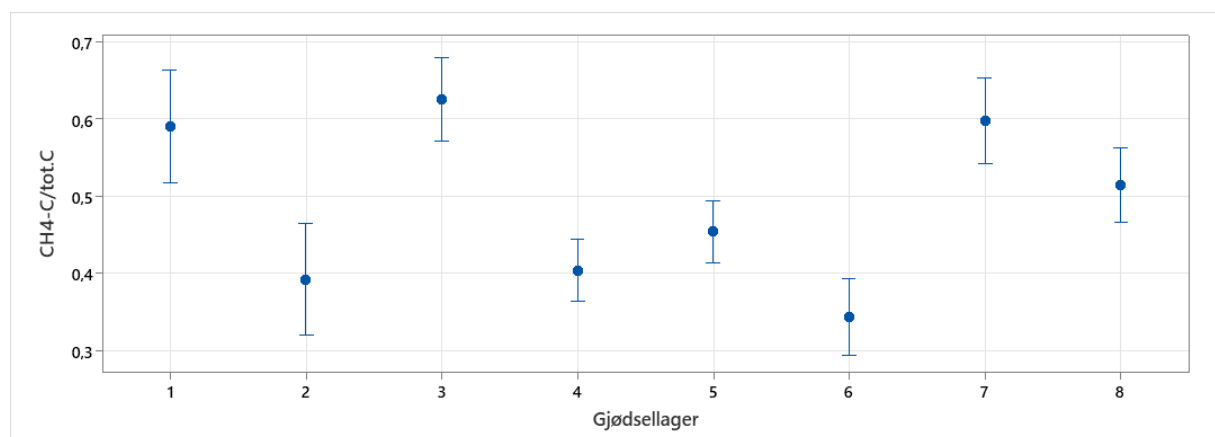


Figur 15. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre uten biorest versus temperatur i 50 cm dyp i gjødsla, pH i bløtgjødsel, tykkelse og tørrstoffprosent i skorpa, kg organisk stoff per m^2 gjødseloverflate (VSm^2) og prosent organisk materiale i bløtgjødsel (%VS i bløtgj.). 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 og gjødsellager se Figur 13.

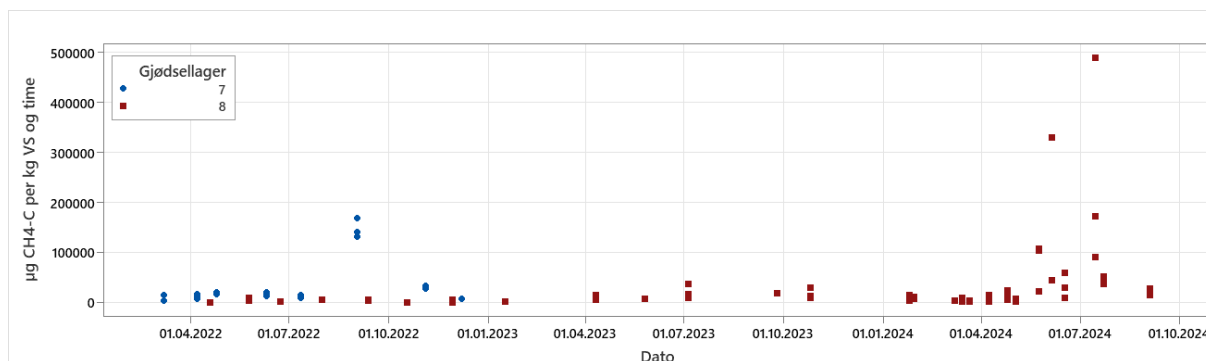
Det viste seg at de tre gjødsellagrene med lavest metanutslipp hadde brukt eller brukte vann fra en dyp brønn (borevann) i fjøset. Den ene tilsatte finmalt, flytende kalk en gang i året (lager 6), mens en hadde høyt kalkinnhold i vannet lager 4 (Figur 16 og Vedlegg). Forholdet $\text{CH}_4\text{-C}/\text{totalt-C}$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



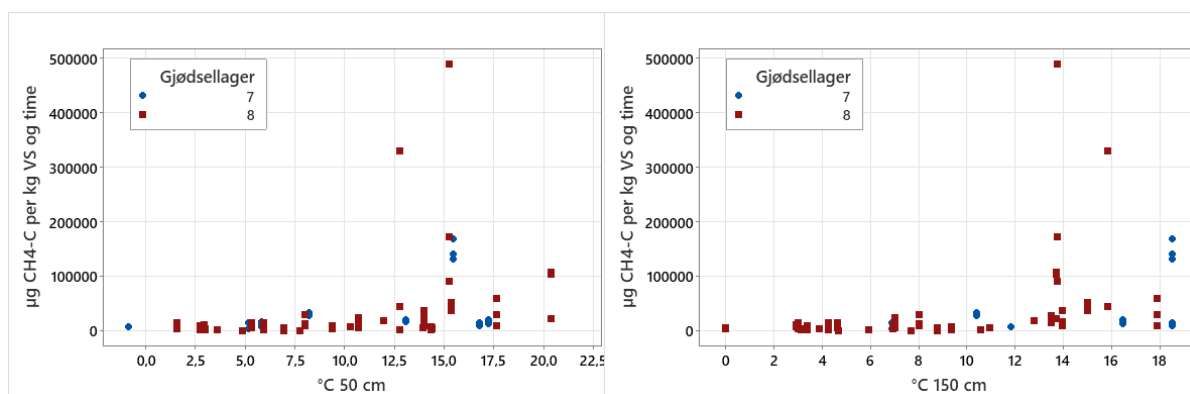
Figur 16. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre uten biorest versus dato. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Brønnvann står for kombinasjonen av vann fra dyp borebrønn og kalk. Enten tilsatt som svært finmalt flytende kalk (lager 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 [$\text{mg CH}_4\text{-C}/(\text{mg CO}_2\text{-C} + \text{mg CH}_4\text{-C})$] i gassutslipp fra ulike gjødsellager. Loddrett linje indikerer 95% konfidensintervall.



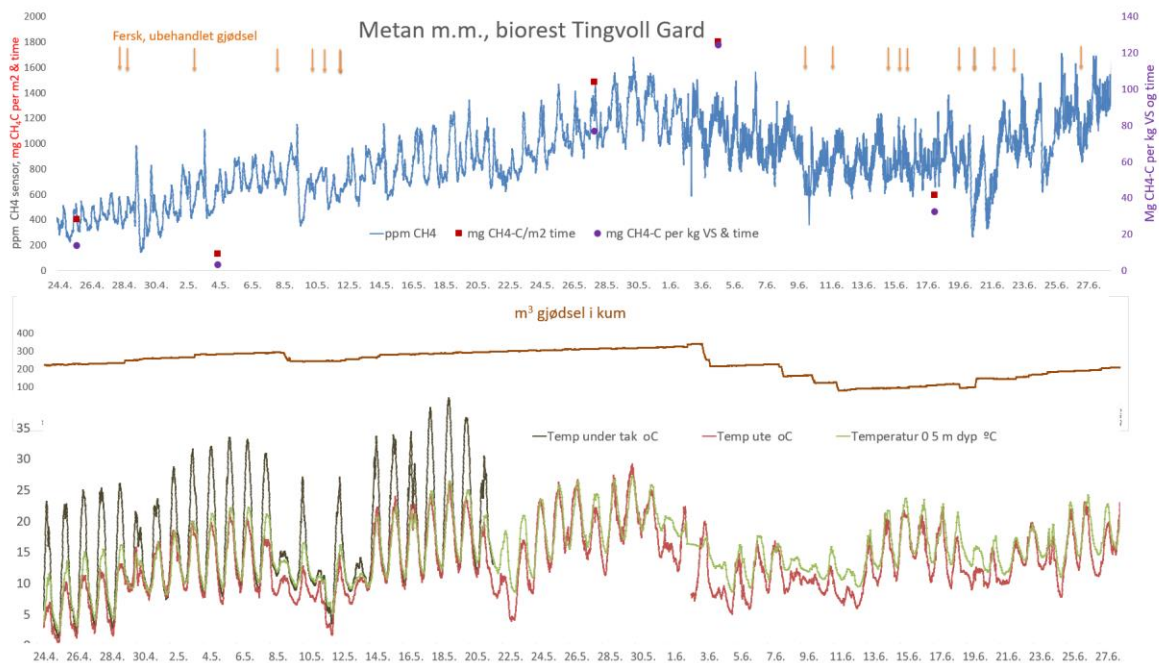
Figur 18. Utslipp av metan ($\mu\text{g CH}_4\text{-C}$) per kg organisk stoff (VS) og time fra gjødsellagre med biorest (lager 7 og 8) versus dato. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se Figur 2 og gjødsellagre se Figur 13.



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) versus temperatur i 50 og 150 cm dyp i gjødsla. Hvert punkt representerer et uttak med gassprøver. Forklaring av uttak se Figur 8 og gjødsellagre se Figur 13.

3.3.2.1 Metansensor

I gjødsellageret på Tingvoll registrerte vi høyere konsentrasjon av metan i lufta over gjødsla etter at det var tilsatt fersk, ubehandlet gjødsel. 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. Kortvarige svingningene ved som respons på temperatur er mest sannsynlig temperaturfølsomhet.



Figur 20. Registreringer på Tingvoll Gard (lager 8) av konsentrasjon av metan ved metansensor over gjødseloverflata (ppm CH₄) sett i sammenheng med utslippshastighet 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 anlegget. Den brune grafen viser mengde gjødsel i lagerkummen. I den nederste grafen viser den svarte linja temperaturen rett under duken i gjødsellageret. Dette var nær metansensorene. 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 nye 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 disse ut. På noen gårder har vi også 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. Det siste skyldes også at for noen gjødsellagertyper var det vanskelig å finne tre gårder. Totalt så har dette ført til at det har vært vanskelig å fange opp eventuelle effekter av type gjødsellager på temperaturen.

Temperatur vil også variere i et stort gjødsellager, både i dybde og i ulike steder i lageret. Dette har vi ikke hatt mulighet til å følge opp i denne undersøkelsen. Også pH varier 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 i forhold til m³ gjødsel omregnet til 6% tørrstoff og metan i forhold kg organisk stoff (VS) i gjødsla, så betyr kvaliteten på gjødselprøvene mye. Der det ikke er skorpe er prøvene ganske representative, da vi tok prøver fra 4 ulike dyp i gjødsellageret og blandet sammen før mengde tørrstoff og organisk stoff bestemmes. Der det var skorpe var det mye 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 bløtgjødsellager, 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 så 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 2160 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 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 lufta 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 så varierer konsentrasjonen av metan over gjødsellageret mye også i våre undersøkelser, både gjennom døgnet og mellom ulike dager. Når vi tar prøver med en måneds mellomrom eller sjeldnere, så blir det stor usikkerhet i registreringer av metanutslipp.

Metansensorene gir kontinuerlig måling, men er foreløpig i en tidlig fase. En utfordring er å få sensorene mer stabile og kunne ha metansensorer som fungerer også uten tilkobling til strøm. I vårt nye prosjekt «Overvåking av metanutslipp fra lager for bløtgjødsel og biorest (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 våre gjødsellager på 8,4°C er ganske likt temperaturen som Rodhe m.fl. (2009) registrerte i et gjødsellager nær Uppsala (8,4°C), lavere enn et gjødsellager i Sørvest-Sverige (9,7°C), men høyere enn nord i Sverige (5,6°C). Den store variasjonen i gjødseltemperatur mellom

gårdene som vi registrerte, viser imidlertid at det er andre faktorer enn breddegrad og lagertype som påvirker gjødseltemperaturen.

Perioder med høyere temperatur i restlageret på de to gårdene med biorest viser hvor viktig det er å ha en effektiv kjøletank som får ned temperaturen før gjødsla slippes ut i restlageret. Begge anleggene har kjøletank, men nedkjøling av bioresten bør og kan forbedres.

4.2.2 Klimagasser

I tråd med våre tidligere undersøkelser (Ebbesvik m.fl. 2021) og mange andre undersøkelser (Meng m.fl. 2023), så fant vi at metan var den dominerende klimagassen fra bløtgjødsellager. Vi bekrefter produksjon av lystgass i porøs skorpe som tidligere beskrevet av blant annet (Sommer m.fl. 2000; Rodhe m.fl. 2012), men der det var våt eller ufullstendig skorpe, så 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).

På gjødsellager 2 og gjødsellager 5 var det betydelig skorpe, samtidig som tak beskyttet mot regn. Det var derfor ofte tørr og porøs skorpe her. Det var i disse to gjødsellagene vi fant de høyeste utslippene av lystgass fra ubehandlet gjødsel (Tabell 3). Men selv i disse gjødsellagene 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 selv gjødsellager med tørr skorpe, et lite problem, og bør ikke brukes som begrunnelse for å hindre skorpedanning som jo er viktig for å redusere ammoniakkutslipp (Misselbrook m.fl., 2005) og sannsynligvis metan-utslipp (Sommer m.fl. 2000; Petersen m.fl., 2005).

Utslipp av lystgass fra et lager med biorest (gjødsellager 8) skyldes antakelig at det av og til ble tilført fersk gjødsel til biorestlageret. Det er flere årsaker til at gjødsel har blitt tilført direkte til biorestlager. Anlegget har vært i en oppstartsfasen og anlegget 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 (1-1,5 m dype kummer). Deres høyeste registrering var på 3,5 g CH₄-C per m³ og døgn, mens bare gjødsellager 3 hadde gjennomsnittlig utslipp som lå under dette (3,5 g CH₄-C per m³ og døgn) i våre registreringer. Metanutslipp beregnet med en dansk modell basert på Rodhe sine resultat fra Rodhe m.fl. (2009) lå imidlertid i samme størrelsesorden som våre gjennomsnittverdier (Rodhe m.fl. 2012). En årsak til forskjell mellom våre og Rodhe m.fl. (2009, 2015) sine resultat, kan muligens skyldes at det er et mye høyere innhold av tørrstoff og 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) så var det et tørrstoffinnhold på rundt 8% og en VS på over 6%. Det var bare et gjødsellager som hadde en VS på over 6% i våre undersøkelser (Gjødsellager 4, Figur 5) og der var det små metanutslipp (Figur 13). Det kan også hende miksing av gjødse før oppfylling kan redusert mengden aktive metanogene arker, da de tåler dårlig omrøring og er dessuten er strikt anaerobe. I gjødsellager som ikke blir helt tømt vil det også bygge seg opp et inokulum over tid. Vi ser at våre resultat ligger 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 sesongen har antakelig jevnet ut noe av usikkerheten ved kammermetoden.

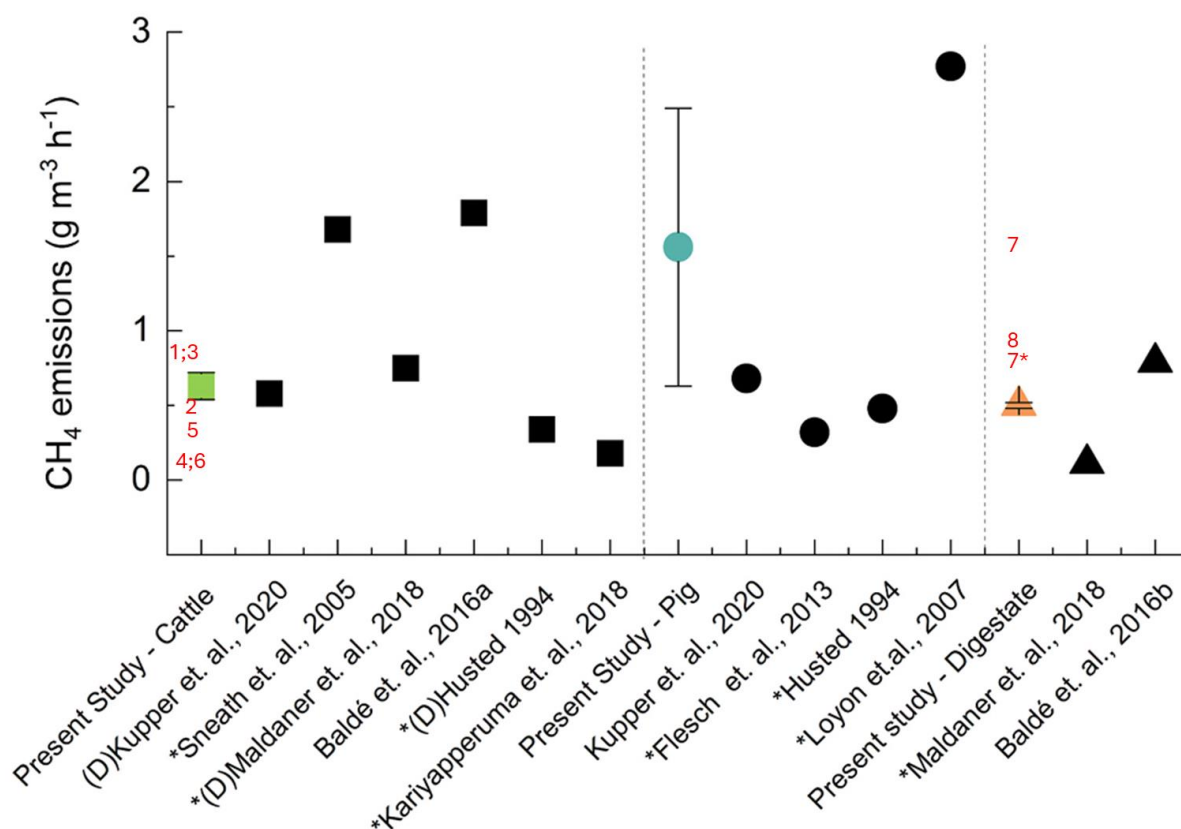
Mange undersøkelser viser at utslipp av metan og lystgass stiger med temperatur (se for eksempel. Sommer m.fl. 2007; Cárdenas m.fl. 2021; Armbrose m.fl. 2023; Vechi 2023). Nedbryting av organisk materiale, og ulike enzymatiske prosesser går raskere og gasstrykket er høyere. Vi fant imidlertid ikke noen 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 gjødsellager 4 og 6 enn de fleste resultat gjengitt av Vechi m.fl. (2023), mens utslippene fra de to lagrene med biorest ligger noe høyere. I begge disse lagrene 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 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. Urea/olje-produktet stammer fra produksjon av Omega 3-fettsyrer hvor urea brukes til å oppkonsentrere Omega-3. Det er sannsynlig at det er nedbrytning av oljen fra den oljerike tørrfraksjonen (15-20%) 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 liten måned etter at vi fant utslippet av metan (vedlegg 10.1.3). Sannsynligvis er det så sterke reduserende forhold at eventuell N_2O vil bli omdannet til N_2 . De høye metan utslippene og registrert H_2S i lufta over gjødsla (1ppm) tyder på det. Det er også høy pH i denne bioresten (8,5 til 9) og det ble registrert ammoniakktutslipp med GA5000 ved den aktuelle målingen. Lufta over biorestlageret inneholdt 5-7 ppm NH_3 .

Gjødsellager 8 er lageret på Tingvoll gard og reaktoren er en forsøksreaktor. Ved det høyest registrerte utslippet ble det tilført store mengder gjødse etter en opprensning i fjøs og ulike gjødselkanaler. Dette sammenfalt med forholdsvis høy temperatur i gjødsla (Figur 19). Dette illustrerer hvor viktig det er å unngå tilførsel av fersk gjødse 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. Lenger oppholdstid i reaktoren og biorestlager på/ved anlegg med tett dekke og oppsamling av gass er eksempel på valg ved utforming av anlegg som reduserer tap av klimagasser fra bioresten. Vi har beregnet våre utslipp ut fra enten kg VS som er gjødsla eller justert utslippet m^3 gjødsel med 6% tørrstoff. Dette fordi det varierer mye hvor mye vann som er i gjødsla. For biorest sin del så slår dette feil ut da en god del av tørrstoffet er brutt ned gjennom biogassprosessen. Det fører til at det blir mindre organisk stoff igjen i gjødsla fra ei ku etter biogassbehandling enn i ubehandlet gjødsel (Maldaner m.fl. 2018). Maldaner m.fl. (2018) fant også at fra samme kubesetning så var utslippene av CH_4 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 biorestlageret 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 gjødsla kan være en viktig forklaring her.



Figur 21. Denne grafen er hentet fra Vechi m.fl. (2023) og viser metanutslipp oppgitt som g CH₄ per m³ og time. 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 bobler av 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). Det kan også skyldes oksidasjon av metan når metan passerer gjennom ei porøs skorpe (Sommer m.fl. 2000; Petersen m.fl., 2005). Eller det kan være 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 NH₃ til N₂O som CH₄ til CO₂. Lavere forhold CH₄-C/totalt-C i gjødsellager 2 enn 1 (Figur 17) støtter denne antakelsen da en oksidasjon av metan til CO₂ 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 CO₂ enn CH₄ mens andelen CH₄ 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 CH₄-C/totalt-C. Fordi forholdet CH₄-C/totalt-C også var lavt når det ikke var skorpe, kan ikke aerob oksidasjon av metan være den eneste årsaken til dette. Lave forhold CH₄-C/totalt-C fant vi også på gjødsellager 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 metautslipp gjødsellager 4 og 6 og muligens 5. I gjødsellager 6 så tilsettes det flytende, finmalt kalk hver vår, men det gjøres også i gjødsellager 3 hvor vi fant mye høyere utslipp. Mistanken vår gikk i retning av vannet da alle disse tre gårdene har brukt eller bruker daglig borevann i fjøset. Dette vannet inneholder blant annet mye kalk og jern. I en undersøkelse av bakteriesammensetningen i gjødsla i gjødsellager 6 (Rittl m.fl. 2024, under skriving per desember 2024) fant vi både anaerobe organismer som produserer metan (metanogene arkebakterier: Methanosarcinales; Methanomicobiales). Og sulfatreduserende bakterier som oksidere metan under anaerobe forhold (Syntrophobacterales; Desulfovibrionales; Desulfobacterales) (Borell m.fl. 2011). 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 CO₂. Dersom hovedårsaken til lave metanutslipp skyldes anaerob metaoksidasjon via sulfatreduserende bakterier så skulle vi imidlertid registrert utslipp av H₂S som observert av Eriksen m.fl (2012). Det gjorde vi ikke.

[illegible]

For di det brukes brønnvann i fjøset med høyt innhold av kalk i gjødsellager 4 og 5, kan det være noe av dei same mekanismene som skjer her. Gjødsellager 5 har også tak og ny gjødsel nedenfra, men her tilsettes det ikkje kalk. Gjødsellager 4 er jo et åpent lager, men det var høy konsentrasjon av organisk materiale da gårdbruker jevnlig sugde ut det mest flytende og overførte til et annet lager.

NORSØK RAPPORT Vol. 9, Nr. 20 Side 44 of 86

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 landbruksdirektoratet med diskusjon

I samarbeid med Landbruksdirektoratet arrangerte NORSØK et åpent, hybrid møte om Klimagassutslipp fra bløtgjødsel 15 oktober 2024. Det var 18 personer til stede i møterommet til Landbruksdirektoratet og 22 på TEAMS. Representanter fra Landbruks og matdepartementet, Miljødirektoratet, Landbruksdirektoratet, NIBIO, Carbon Limits, NLR, Bondelaget, Bonde- og småbrukarlaget, 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 så 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 fra 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 seg 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 ulike regioner i Norge, den relative andelen av husdyrgjødsel i hver region og hvor ofte gjødsla blir tatt ut av lageret. Usikkerheten i B_0 (Maksimal metanproduksjonskapasitet) og MCF (metankonverteringsfaktor) og andre faktorer ble diskutert en del på møtet. Det kreves en grundig dokumentasjon for å gjøre forandringer i metanmodellen. Fullstendig tømning av husdyrgjødsellager, lav temperatur i lager av bløtgjødsel og biorest, unngå blanding av biorest og fersk gjødsel på lager, tilsetting 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.

5 Anbefalte tiltak for reduserte klimagassutslipp fra gjødsellager i Danmark og Sverige

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

Gjennomsnittlig utslippsfaktor (CH₄-utslipp/CH₄ 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

De anbefaler 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
- H₂S hemmer vekst av mikro-organismene

Oppsamling og fakling av gass

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

Ventilert flytelag på bløtgjødsel

Porøst flytelag oppå gjødsel med tilførsel av O₂

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 har de gitt ut en rekke rapporter med anbefalinger av tiltak som reduserer utslipp av klimagasser fra husdyrgjødsel.

Växthusgaser och stallgödsel

- JTI-rapport nr 337: 'Täckt ytmyllning av flytgödsel i vall –teknikutveckling, ammoniakavgång, växthusgaser och avkastning'
- JTI-rapport nr 370: 'Växthusgasemissioner från lager med nötflytgödsel'
- JTI-rapport nr 402: Växthusgaser från stallgödsel -Litteraturgenomgång och modellberäkningar
- JTI-rapport nr 413: Växthusgaser från rötad och orötad nötflytgödsel 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 orötad gödsel
- RISE-rapport 2019:51: Ammonia emissions from storage: non-digested and digested cattle slurry, with and without acid.

På webinar 15 oktober 20214 sammenfattet forsker og docent Lena Rodhe generelle anbefalinger om tiltak for å redusere utslipp av klimagasser fra gjødsellager for storfe under svenske forhold, slik (Fritt oversatt av S.Hansen):

- Lagre gjødsel svalt om sommeren. Daglig utgjødsling fra fjøs. Ha dype lager. Lite gjødsel på lager om sommeren.
- Valg av dekke på bløtgjødsel har betydning. Vær obs på lystgass.
- Dekke av 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, slik at for eksempel tiltak for å redusere metanutslipp ikke fører til økte lystgassutslipp eller økt energibehov.

Sammanfattning LAGRING stallgødsel

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

Lena Rodhe sammenfattet undersøkelser gjort av Berglund og Mjölfors (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, man 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 ammoniakkutslipp, men ikke for å redusere metanutslipp. Tak kan forsinke oppvarmingen om våren og avkjølingen om høsten. Det kan være en fordel å vente med lager med tak til slutt ved spredning om gjødsel 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 gjødsel på lager om sommeren

6 Tiltak og anbefalinger for reduserte klimagassutslipp fra bløtgjødsellager fra storfe

6.1 Generelle anbefalinger

Lav temperatur i gjødsellageret vil redusere utslipp av metan (CH_4), lystgass (N_2O) og ammoniakk (NH_3). Tiltak som vil 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 gjødsla enten det er tak eller flytende dekke, bruk så lyse farger som mulig. Dette for å unngå at gjødsellageret
- 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 både å redusere ammoniakkefordamping ved spredning og utslipp av ammoniakk og metan gjødsellager. I Danmark anbefales nå en lavdose med 2 kg syre per tonn gjødsel. På grunn av fare for lystgassutslipp ved tilsetting av salpetersyre (HNO_3) anbefales svovelsyre. Det må tilføres ny syre ved lang lagringstid og tilførsel av ny gjødsel på grunn av gjødsla sine bufferegenskaper (Andersen m.fl. 2024). Det er ikke tillatt å bruke svovelsyre i økologisk landbruk.

Tett lager og oppsamling av gass er en måte å hindre utslipp fra både lager for ubehandlet gjødsel og biorest dersom gassen enten føres sammen med øvrig gass fra gården og utnyttes eller behandles. I Danmark så har de utviklet en metode til å fikle gassen (Andersen m.fl. 2024). Ved å brenne gassen så omdannes metan til CO_2 .

Biogass. Ved utråtning av gjødsel i et biogassanlegg så 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 gjødsellager kan dermed bli redusert både ved at det er mindre organisk materiale i biorest og ved 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 raskt oppformerer når de får ny mat og starter å produsere metan dersom de får tilført ny næring. Det er derfor viktig å ikke mate dem. 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
- Lenger 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

6.2 Mulige tiltak som trenger utprøving før de anbefales

Redusere vanntilførsel for dermed hindre uttynning 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 og våre resultat indikerer dette). Det trengs flere undersøkelser for å stadfeste dette og også hvilke organismer som er involvert. Tiltak for høyere konsentrasjon av VS kan være:

- Tak over gjødselkum for å unngå nedbør
- Unngå vaskevann fra fjøset
- Ved lagdeling sug ut deler av den lettflytende gjødsla tidlig på våren og spre den på eng dersom det er jorder med tidligere vår enn ellers

Tilsetting 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 kalktilsetting 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 og biorest reduserer innholdet av VS i bløtgjødsel, og dermed kunne redusere mengden substrat for metanogene organismer (VanderZaag et al., 2018). Det vil også kunne gi en lettflytende del som vil gi god infiltrasjon 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 svært 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 slå ut 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). En slik lufttilførsel vil øke nedbryting av organisk materiale og gjøre 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 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 n.fl. 2021). Det trengs kontinuerlig modellering og testing for å få til dette. Det er dessuten viktig å se hele kjeden i sammenheng, så ikke sparte klimagassutslipp fører til økte utslipp en annen plass. Dersom det gjøres tiltak i føring for å redusere metanutslipp fra dyra må også konsekvenser for utslipp fra gjødsellager undersøkes. Ved tiltak i gjødsellager må det undersøkes om det kan øke utslipp ved spredning av gjødsel.

Det trengs rimeligere, mindre arbeidskrevende og mer nøyaktige metoder for å undersøke metanutslipp ute på norske gårdsbruk. Dette prosjektet og andre prosjekt har vist at det er store forskjell i utslipp fra ulike gjødsellager. For å kunne identifisere de beste tiltakene for å redusere metanutslipp, er det viktig å bedre kunne identifisere hvilke faktorer som reduserer utslipp. Gjødsellager på gårder skiller seg fra forsøkskummer både i størrelse, utforming og tilførsel av ny gjødsel, og gjødsellager ut på gårdene skiller seg fra hverandre. Kammermetoden er kostbar, det er utfordrende å få tatt representative prøver der det varierende grad av skorpe over gjødsel og det er ikke mulig å ta prøver når gjødsel 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 automatisk måleteknologi .

For å bedre kunne kvantifisere klimagassutslipp fra bløtgjødsellager og kunne dokumentere effekt av ulik husdyrgjødselhandtering trengs det bedre dokumentasjon av effekt av ulike typer skorpe på netto utslipp av lystgass og metan, bedre estimat på andel lett nedbrytbare karbonforbindelser ved ulike lagertidspunkt og forhold og bedre modell for beregning av metanutslipp fra ulike punktkilder (Prof. 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 er ikke egnet til å beskrive gjødselhandtering på gårdsnivå,
- Aktivitetsdata gjenspeiler ikke faktiske drivere
- En modell med daglige tidstrinn er nødvendig for å ta høyde for ulik handtering og effekter av tiltak for reduserte klimagassutslipp
- Det er behov for eksperimentell validering av modellparametere, eller bruke proxy som kan kvantifiseres for individuelle punktkilder

- Forbedret gjødselhåndtering kan i betydelig grad bidra til å redusere klimagassutslipp på husdyrbruk

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 for å unngå økte klimagassutslipp og samtidig sikre en best mulig gjødseleffekt så må det undersøkes hvordan minimalisere klimagassutslipp og samtidig optimalisere gjødseleffekt og ved bruk. En løsning for å redusere uønskede utslipp av metan fra biorestlager kan være å tilsette urea/olje-produktet rett før gjødsla spres, men vi vet enda ikke nok om effekter av dette til å gå ut med en generell tilråding. Økt bruk av slike urea-produkter i landbruket som erstatning for kunstgjødsel gjør at en bør studere hvordan optimalisere gjødseleffekt og minimalisere klimagassutslipp ved bruk av disse.

8 Konklusjon

Metan er den viktigste kilden til klimagassutslipp fra lager for bløtgjødsel fra storfe. Selv om utslipp av metan og lystgass øker med temperatur så er det andre faktorer som betyr mer for dannelse og frigjøring av disse gassene under praktiske forhold. Det var lav temperatur i gjødsla i de gjødsellagrene vi undersøkte med bare få dager over 15°C selv om sommeren. Høyest var temperaturen i lagre for biorest, og utslipp av metan var ikke lavere her enn i lagre for ubehandlet storfegjødsel. Tilsetting av fersk gjødsel eller annet energirikt materiale som urea/olje-produkt gir øking i metanutslipp fra lager for biorest. Bygningstype ser ikke ut til å bety mye for utslipp av metan, men vanninnholdet i gjødsla kan være en faktor som er undervurdert. Vi fant lavest utslipp av metan der det var høyest konsentrasjon av organisk materiale i gjødsla. Muligens er dette også en effekt av kalktilsetting og økt nedbryting av organisk materiale. Effekten av vann kan skyldes at nedbrytningsprodukt som er giftige for metanogene fortynnes i vann. Dette må undersøkes nærmere. 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. Det trengs bedre modeller for vurdering av ulike tiltak for reduserte utslipp av klimagasser fra gjødsellager. Til det trengs bedre grunnlagsdata. Metansensorer som kontinuerlig overvåker konsentrasjonen i lufta over gjødsellager, kan være en hjelp til å få til dette. Foreløpige registreringer tyder på at slike sensorer kan gi en god pekepinn.

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. og 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. og Hansen, S. 2021. . Klimagassutslipp fra utendørslokaler 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.
- 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. and 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 og Alper 2020. Bruk av gjødselressurser i jordbruget 2018. Metodebeskrivelse og resultater fra en utvalgsbasert undersøkelse. Statistisk sentralbyrå. Rapporter 2020/9. 123 s.

- 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 m.fl. 2005. Atmospheric pollutants and trace gases crusting of stored dairy slurry to abate ammonia emissions: Pilot-Scale Studies. *J. Environ. Qual.* 34, 411–419.
- Orlando, M.Q., Borja, V.M., 2020. Pretreatment of animal manure biomass to improve biogas production: A review. *Energies* 13.
- Petersen m. fl. 2005. Methane oxidation in slurry storage surface crusts. *J. Environ. Qual.* 34, 455–461
- 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>
- Rodhe, L., Ascue, J., Tersmeden, T., Ringmar, A. og 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. 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. K. K., 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 växthusgassutsläpp fra lager med fermentert og ubehandlet gjødsel. RISE Rapport, Uppsala, Sverige 2018:18. 52 sider.
- 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>
- 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

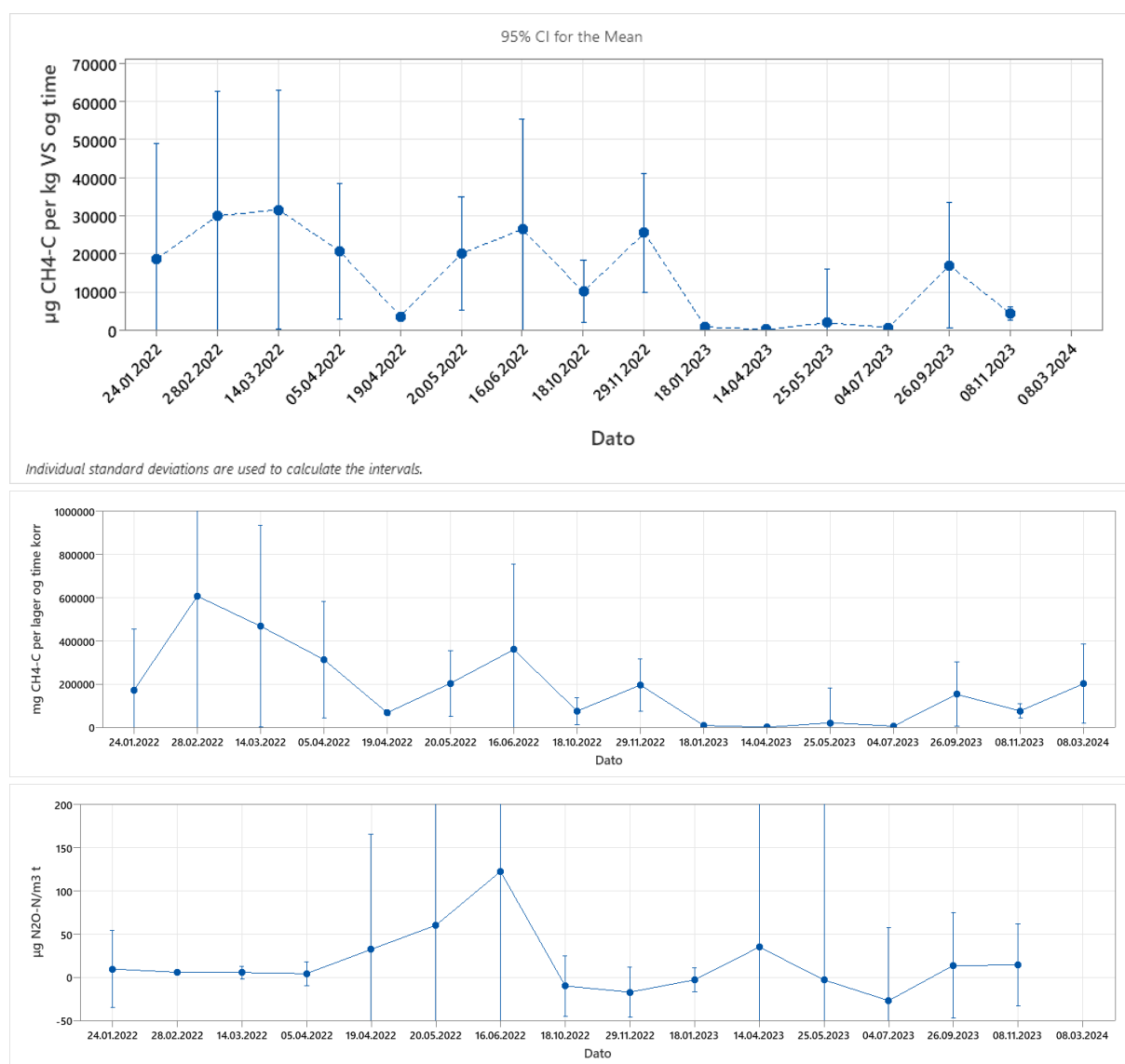
Vedlegg nummereres og henvises til i teksten som (Vedlegg 1).

10.1Vedlegg 1

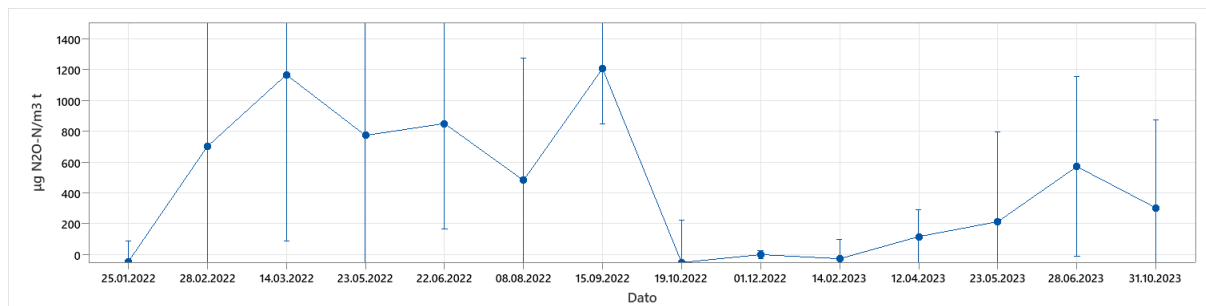
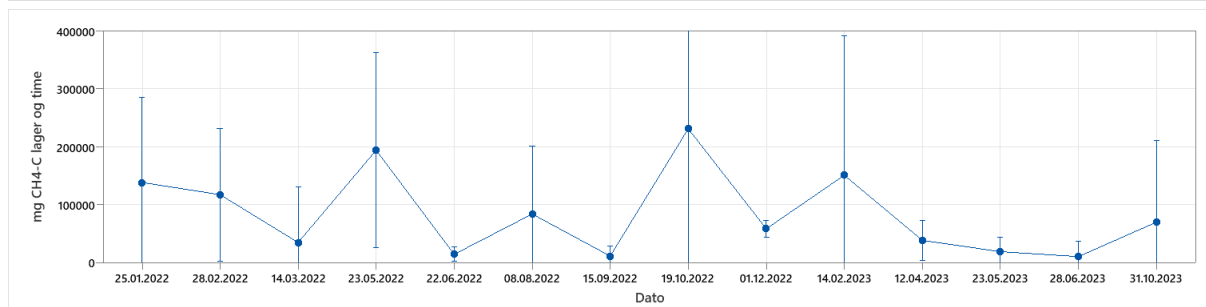
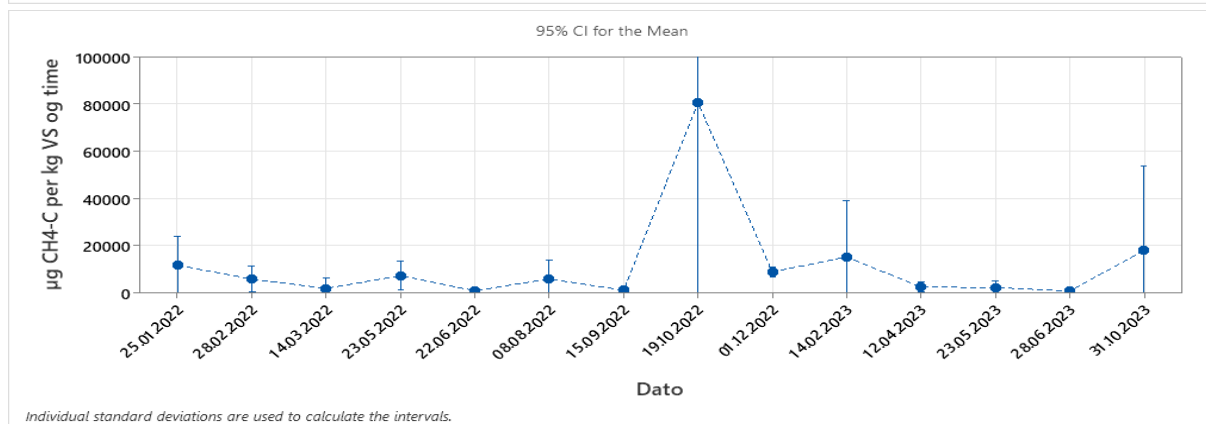
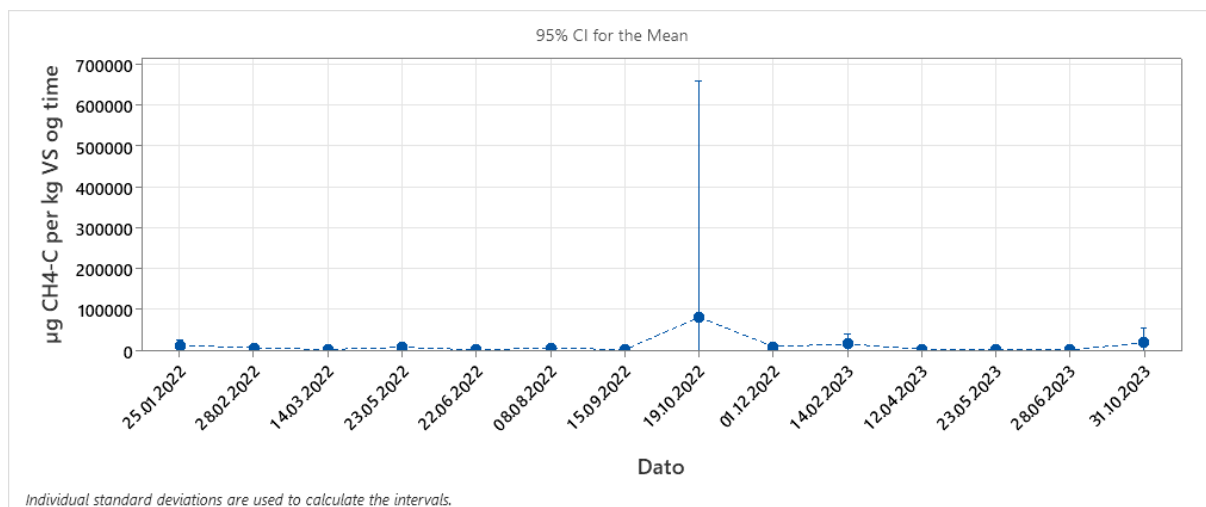
Diagram over registrerte parametre på gårder hvor det ble undersøkt gassutslipp

10.1.1Gårder med kjeller, to gårder

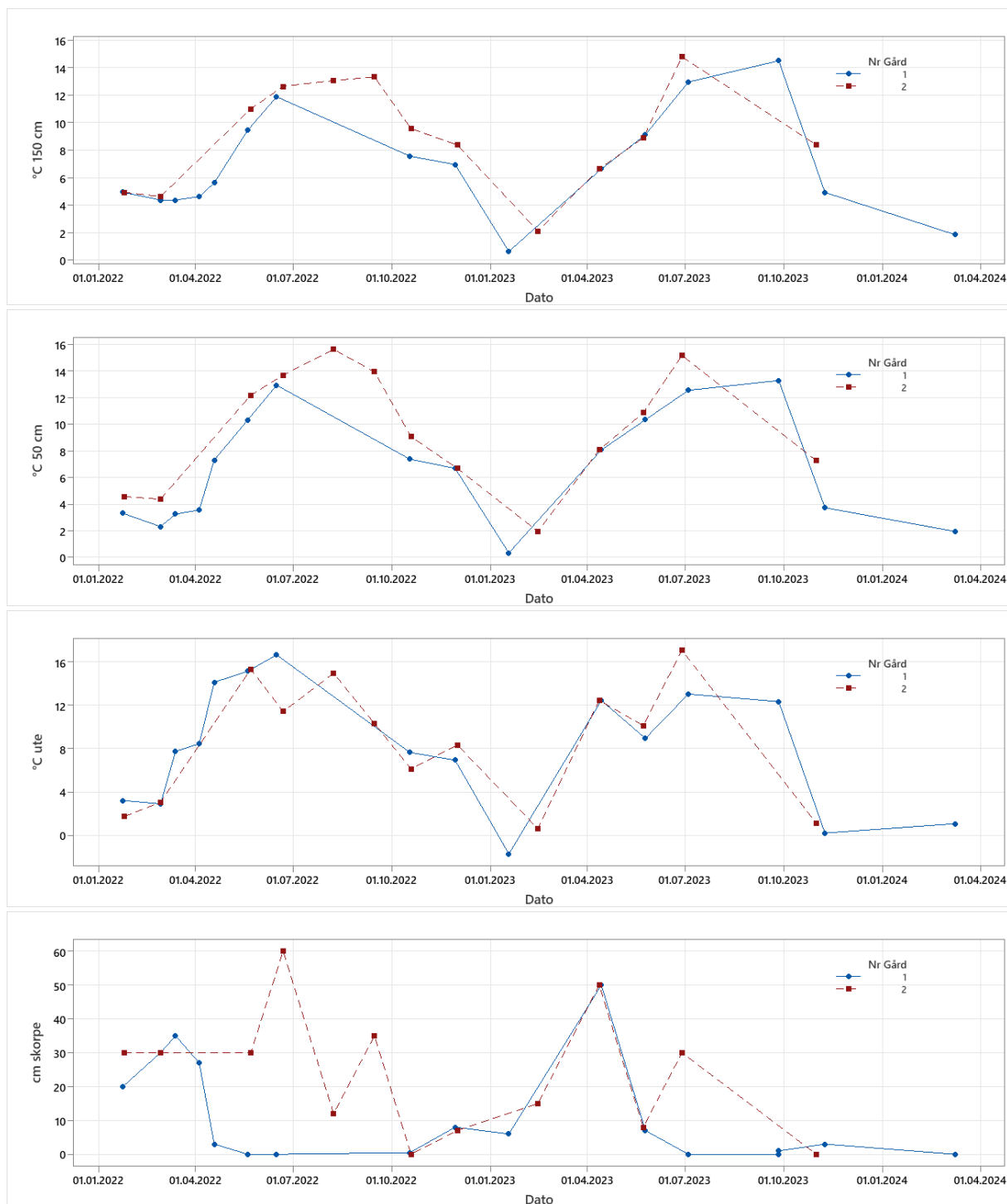
Gjødsellager 1.

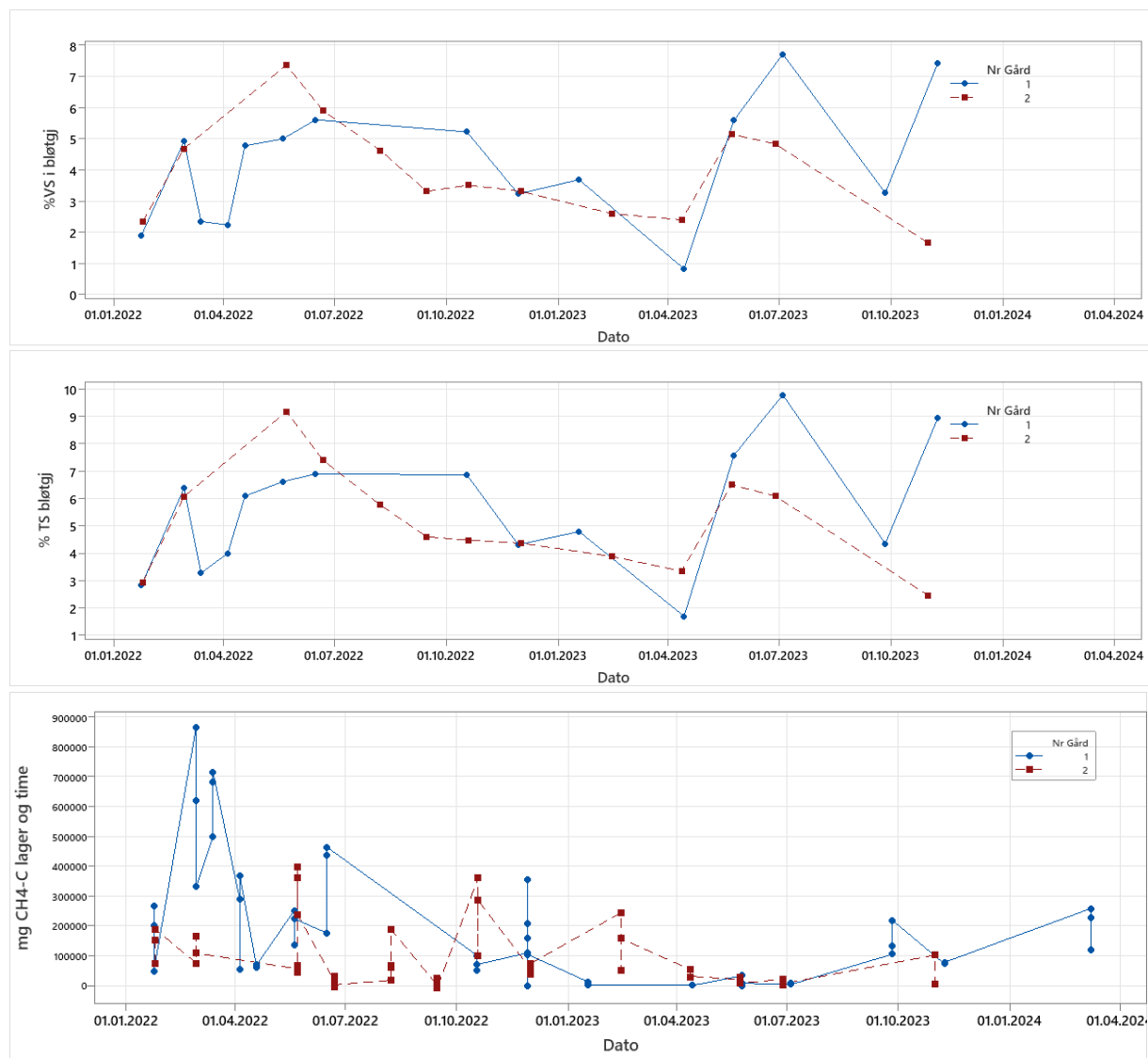


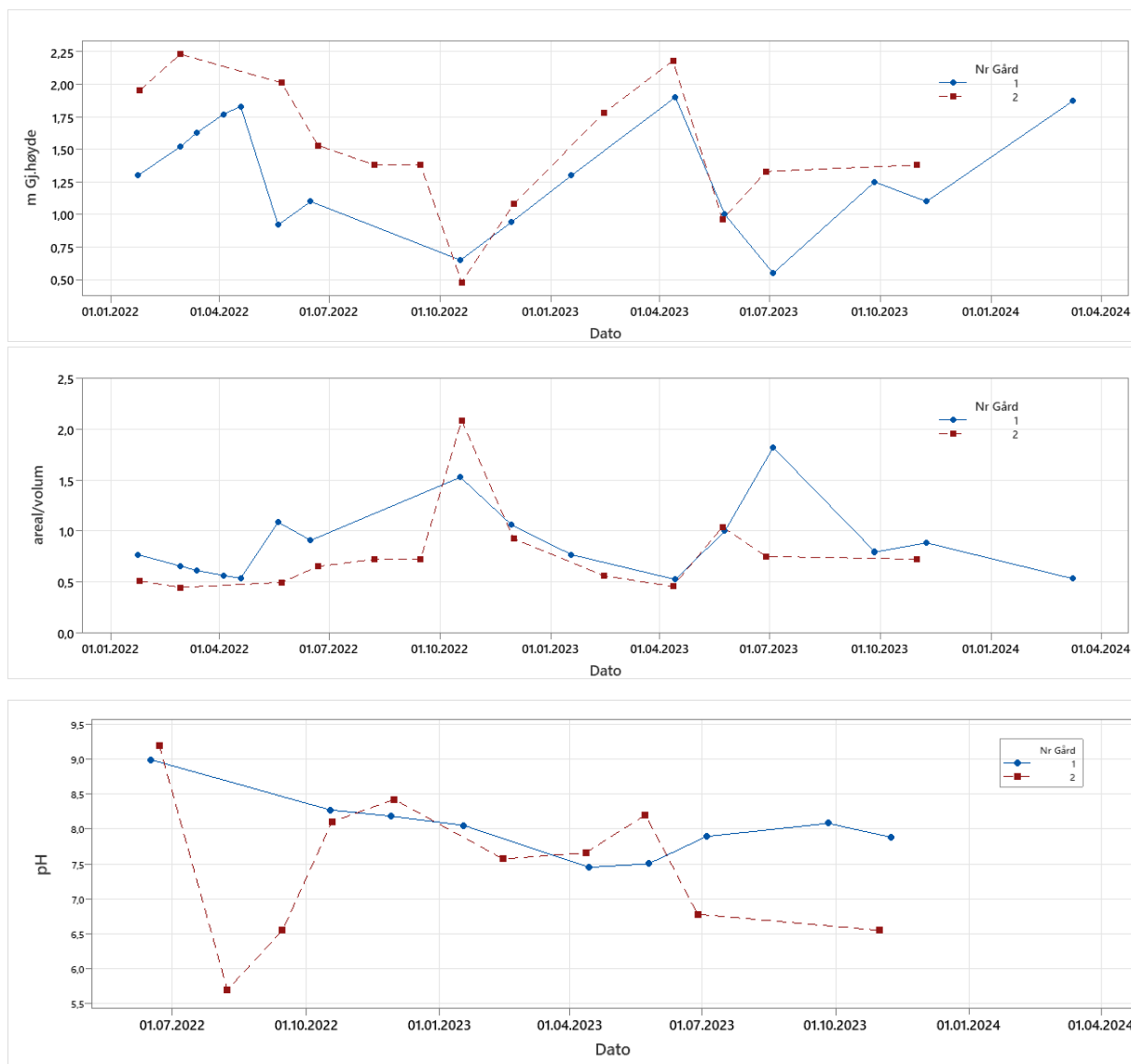
Gjødsellager 2.



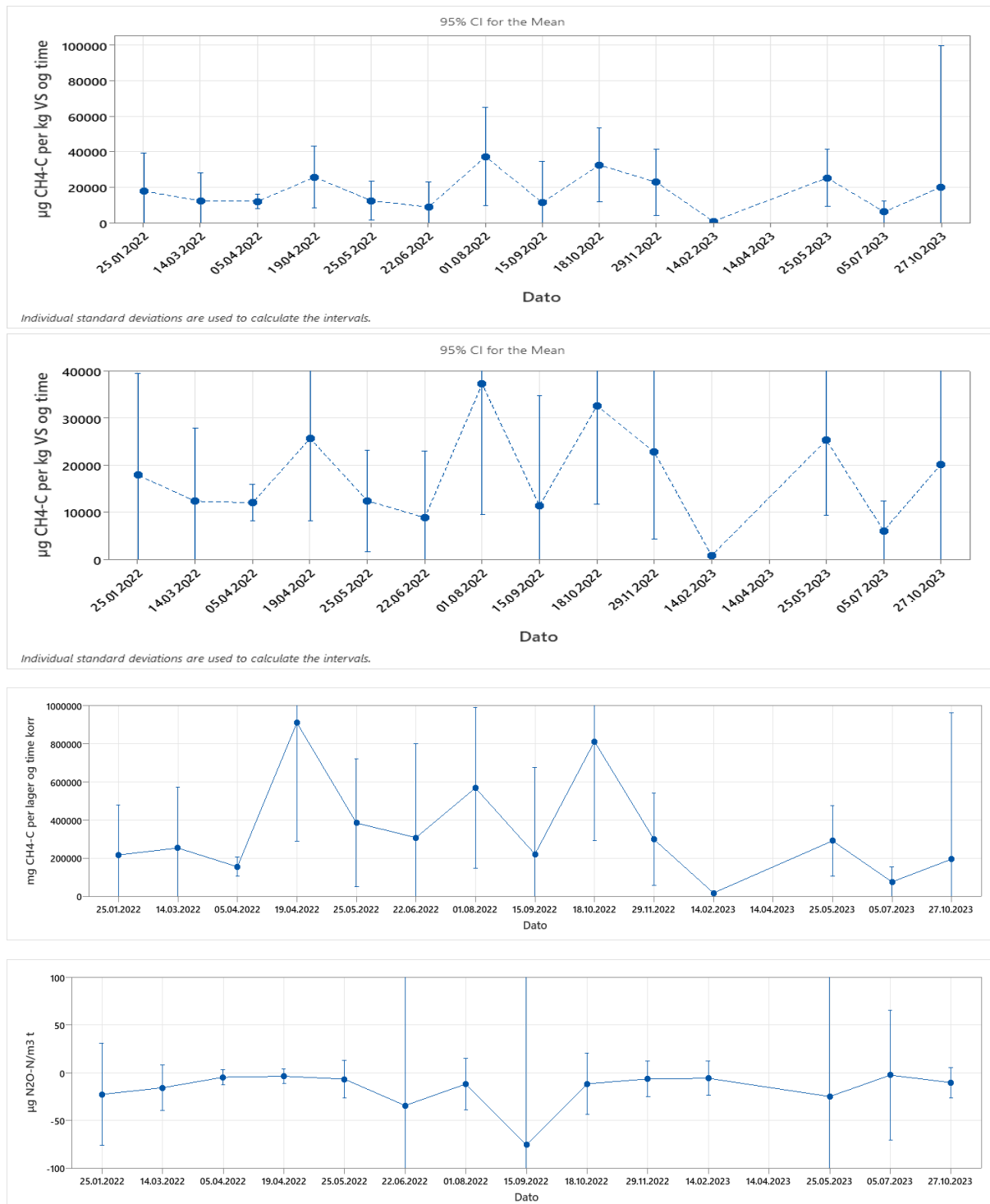
Gjødsellager 1&2



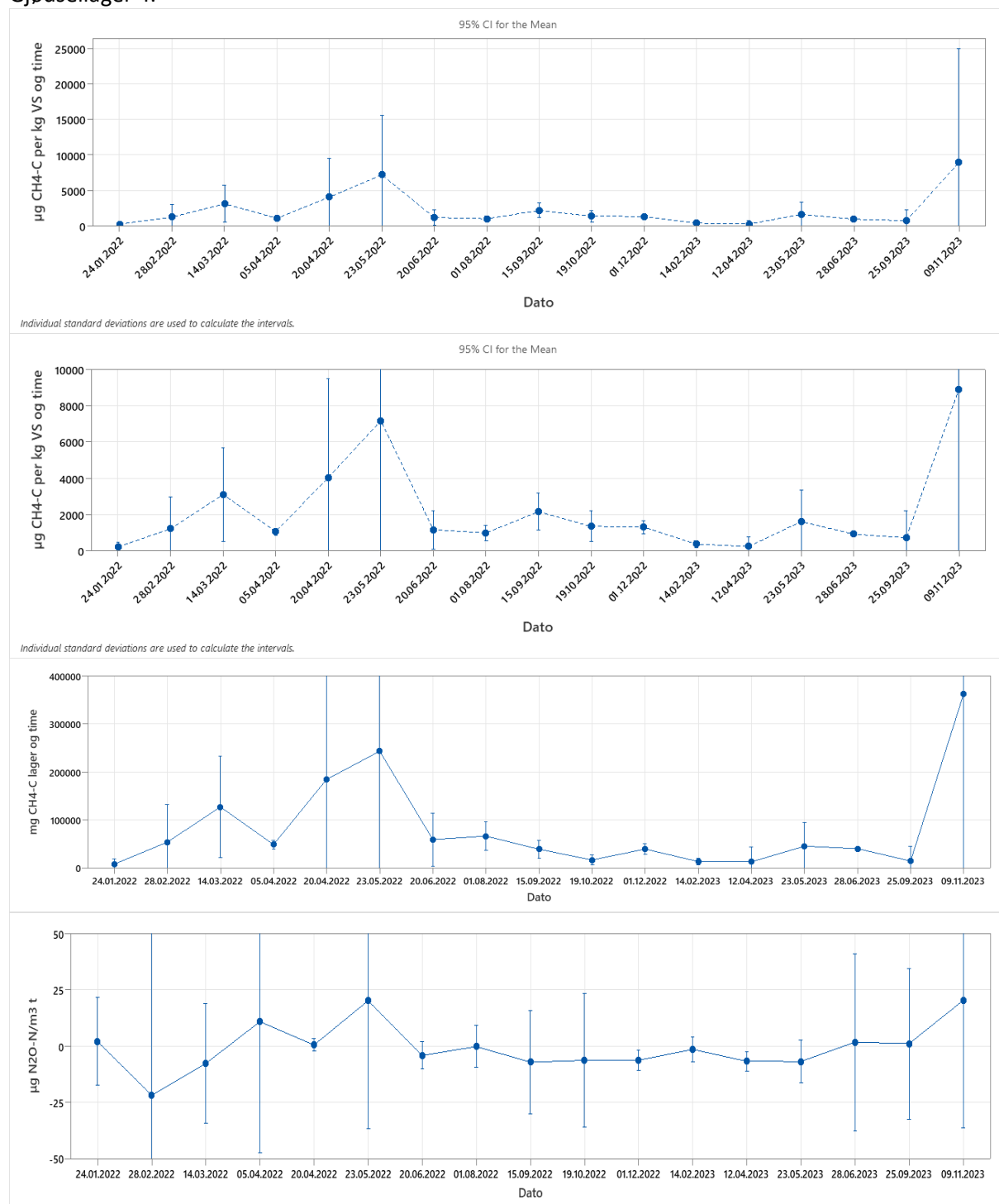




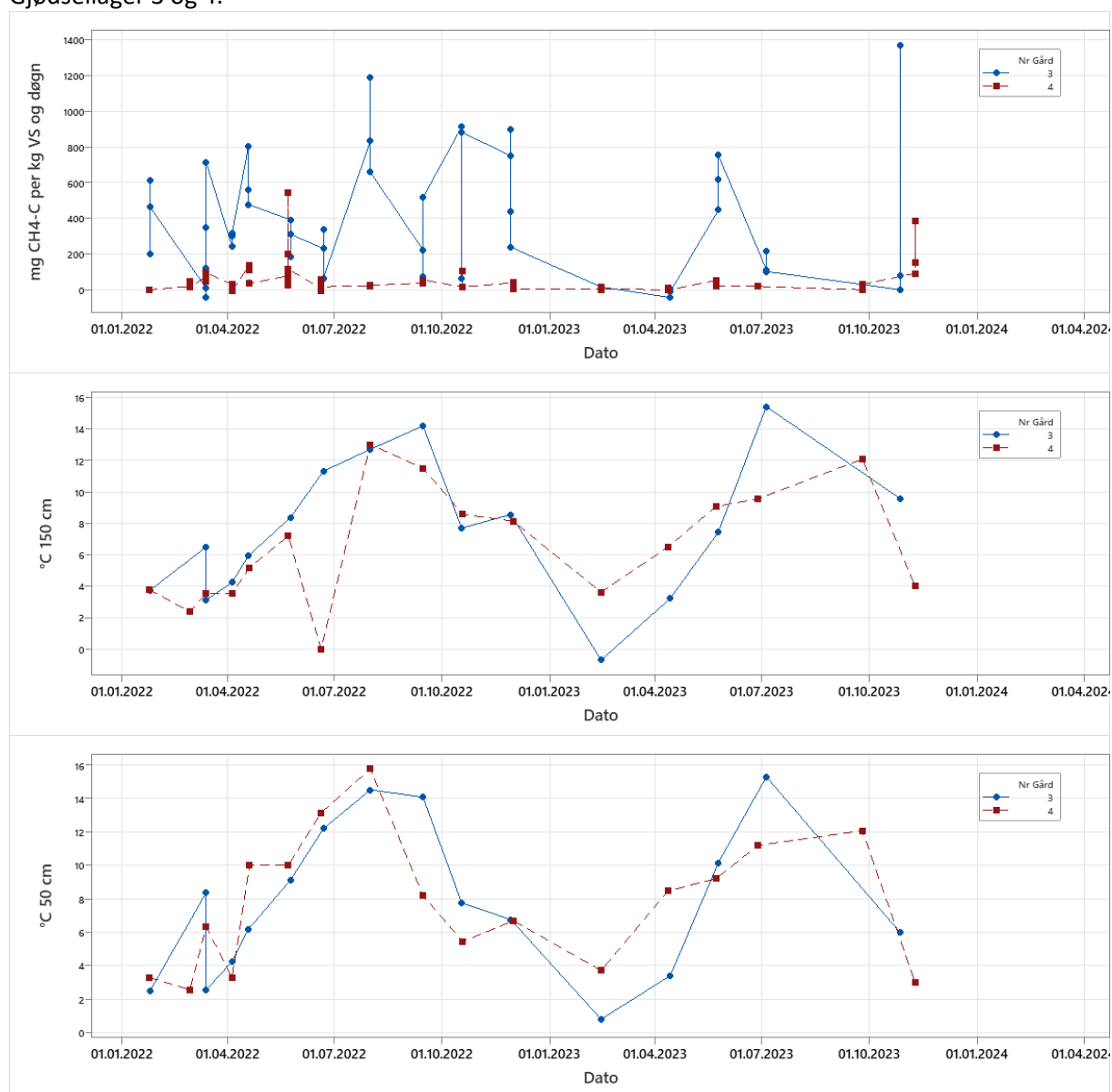
Gårder med Åpen kum, to gårder
Gjødsellager 3.

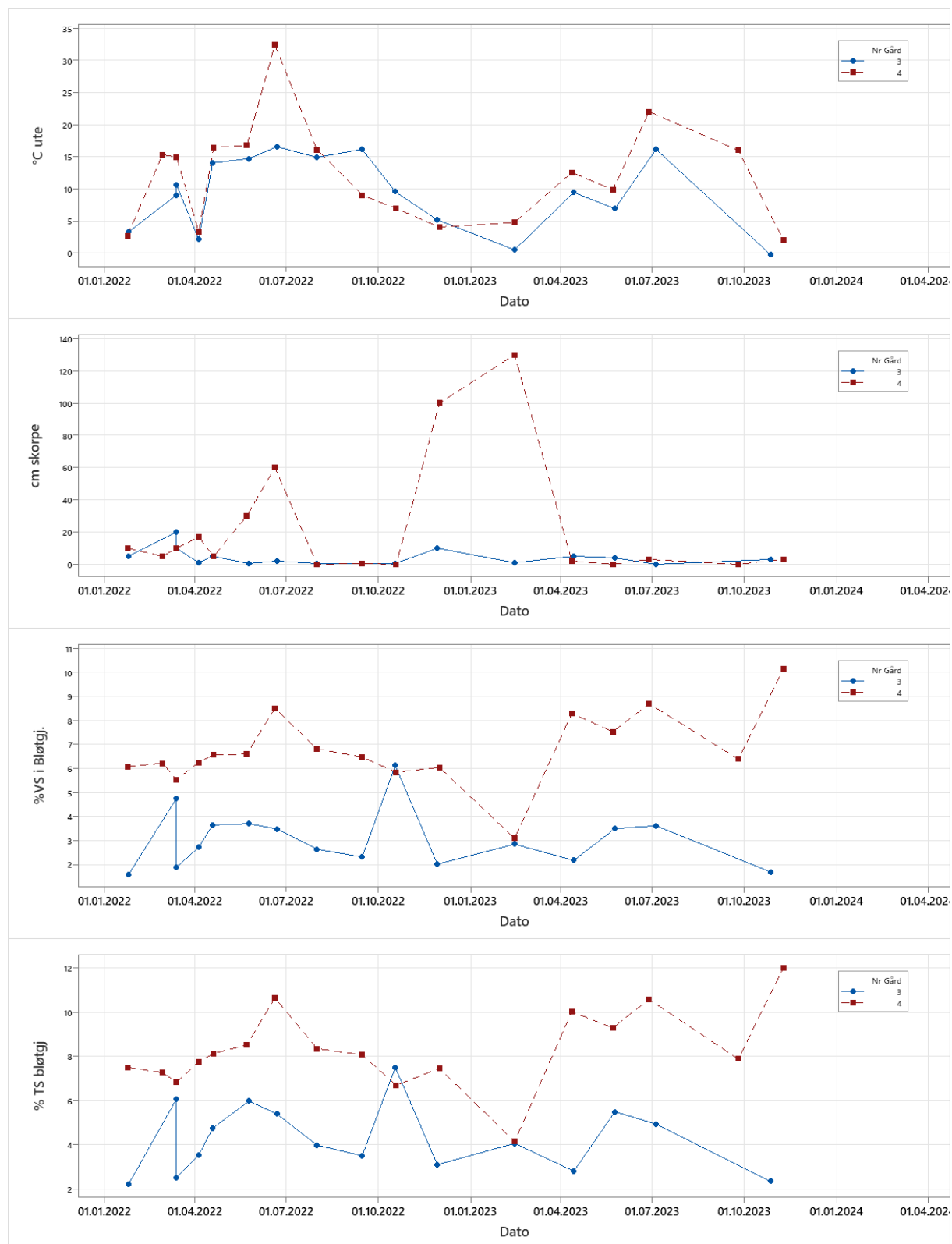


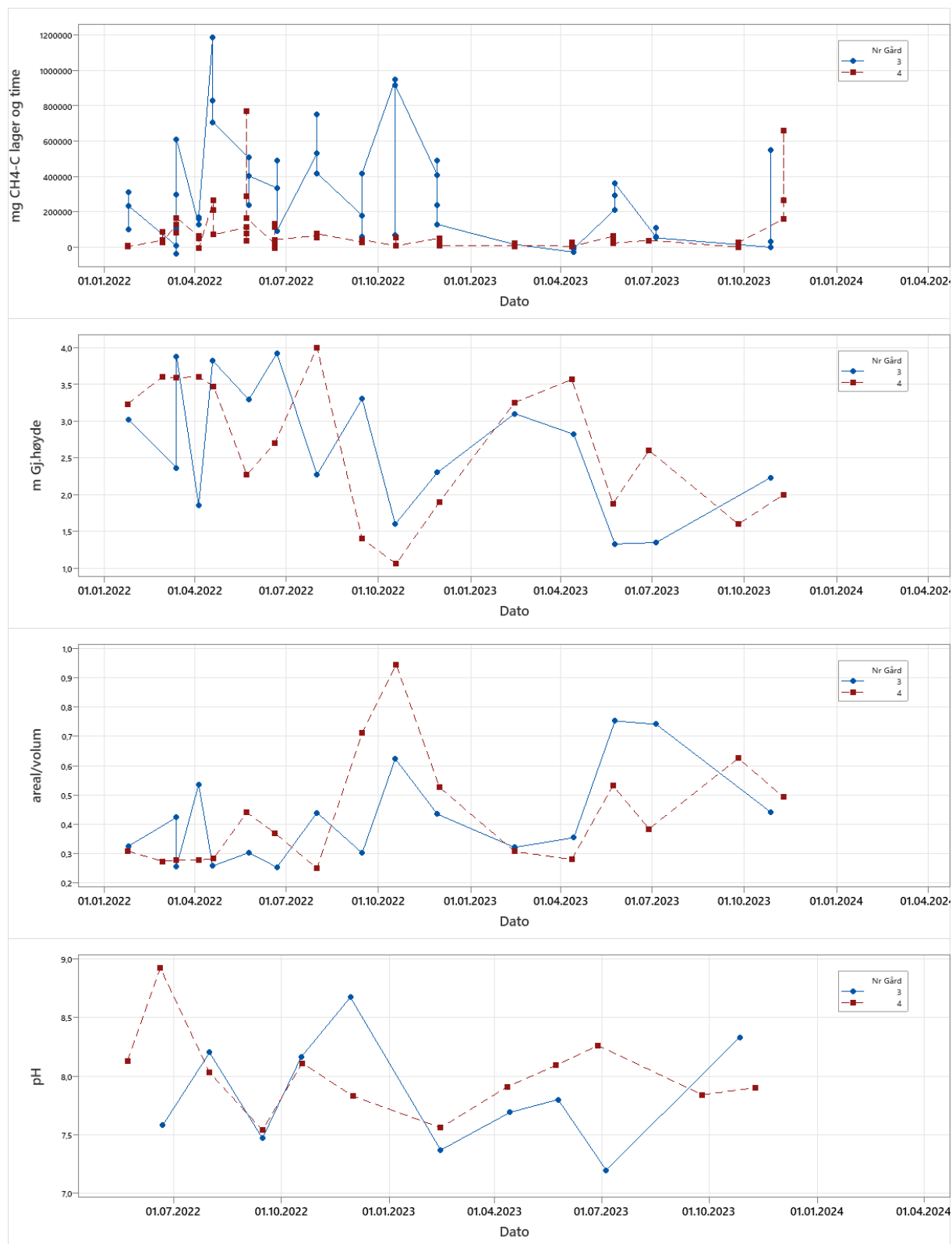
Gjødsellager 4.



Gjødsellager 3 og 4.

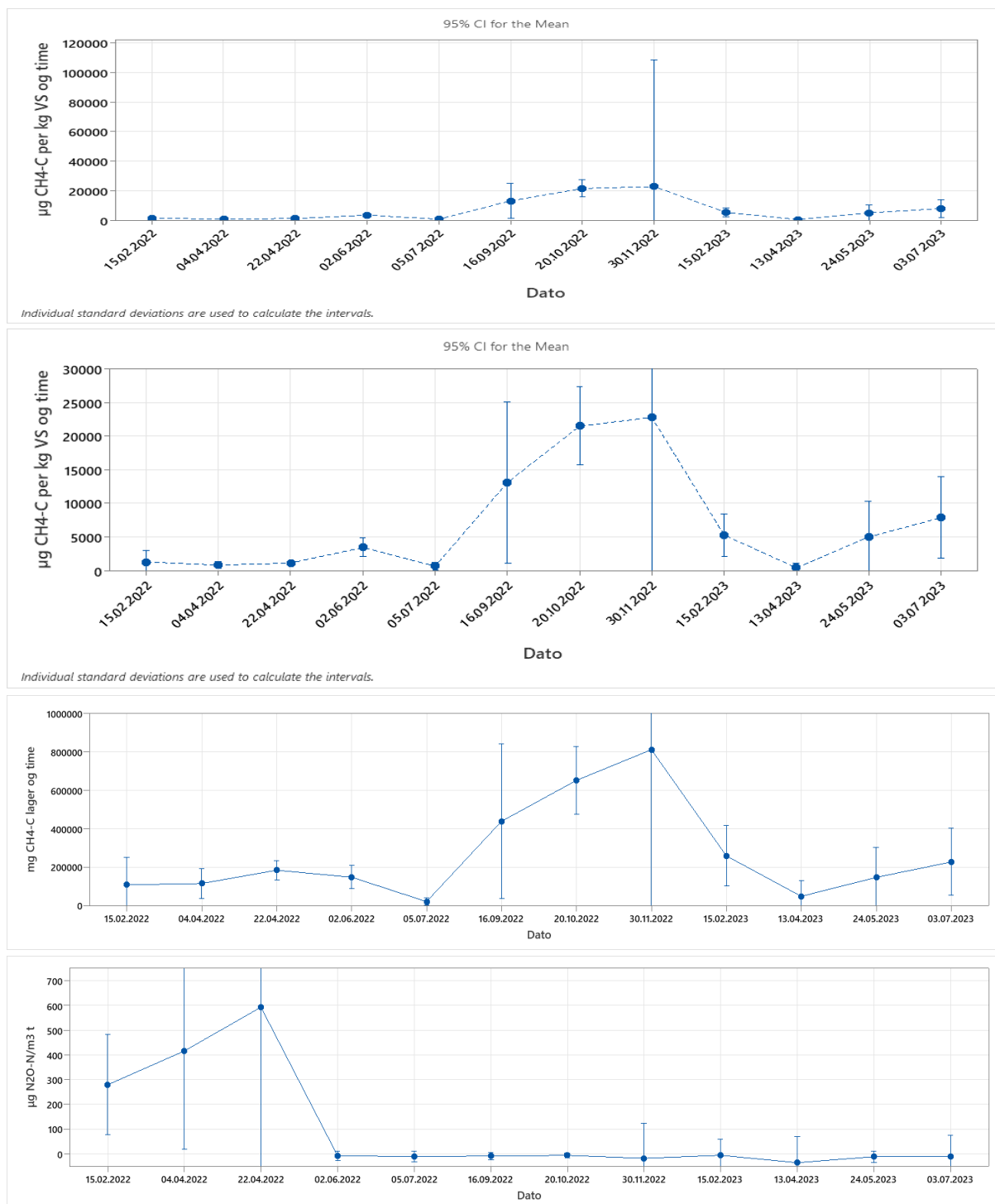




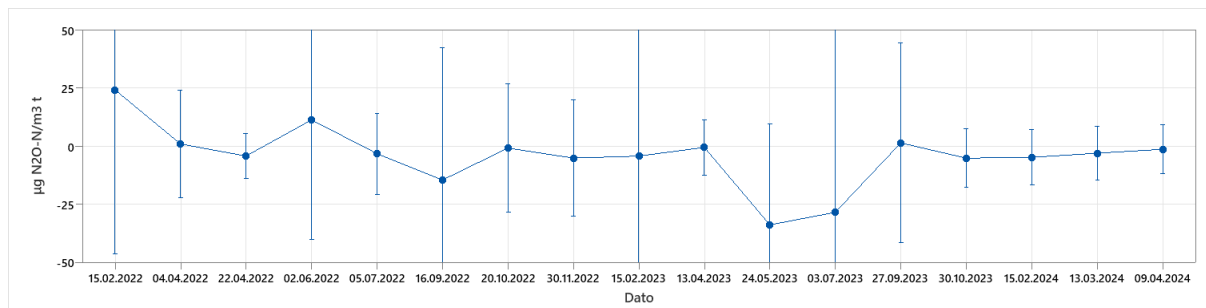
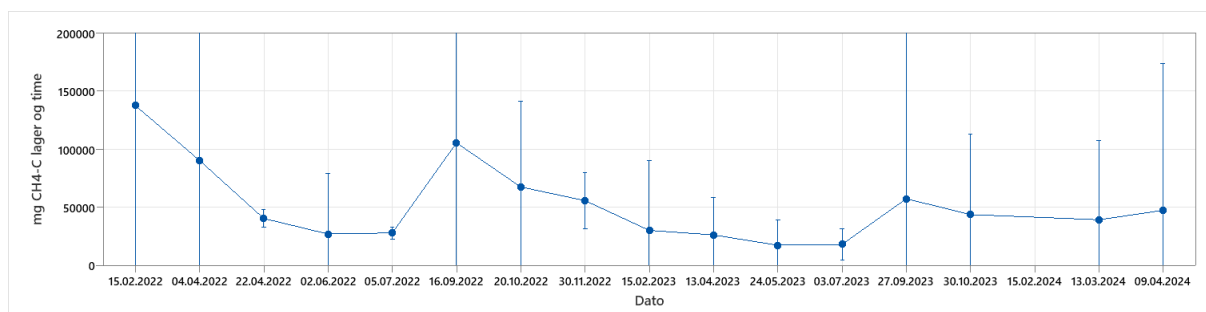
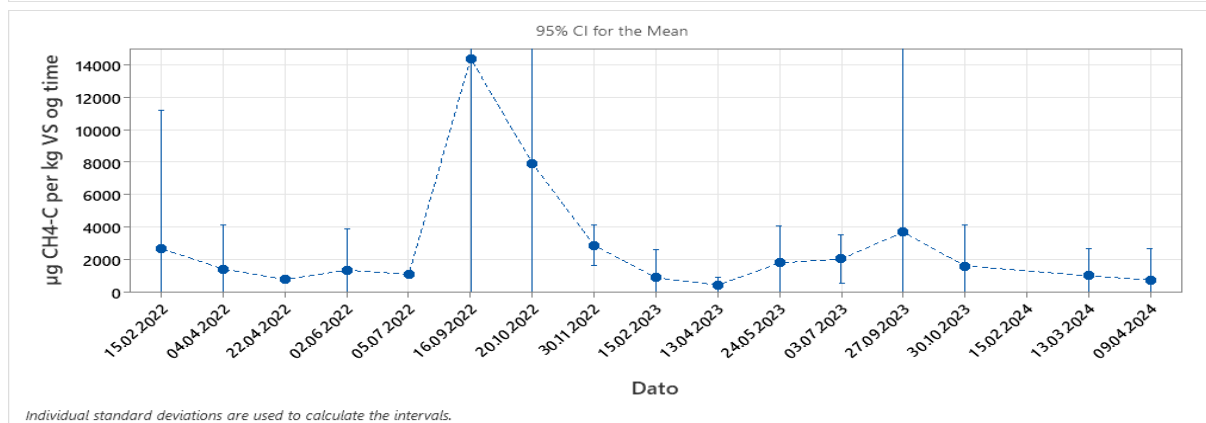
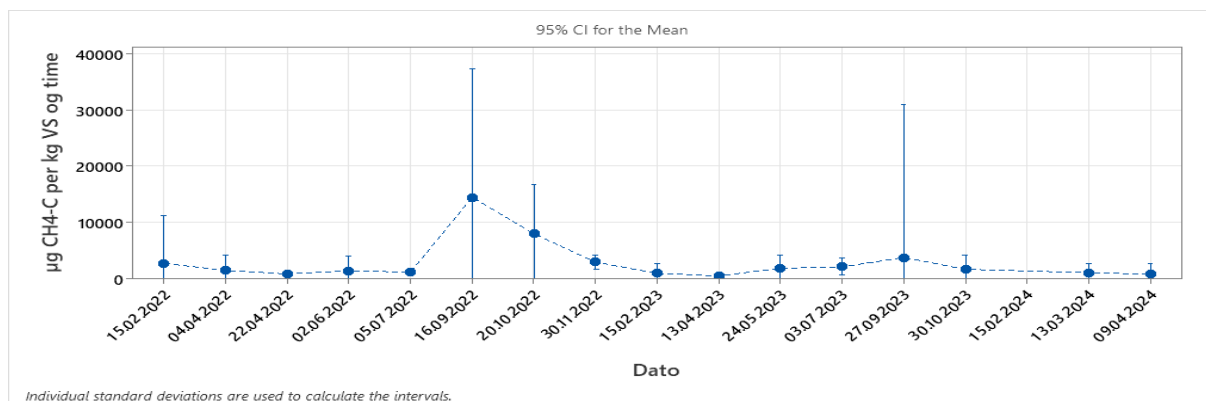


10.1.2 Gårder med kum med PVC-tak, ny gjødsel under skorpa, to gårder

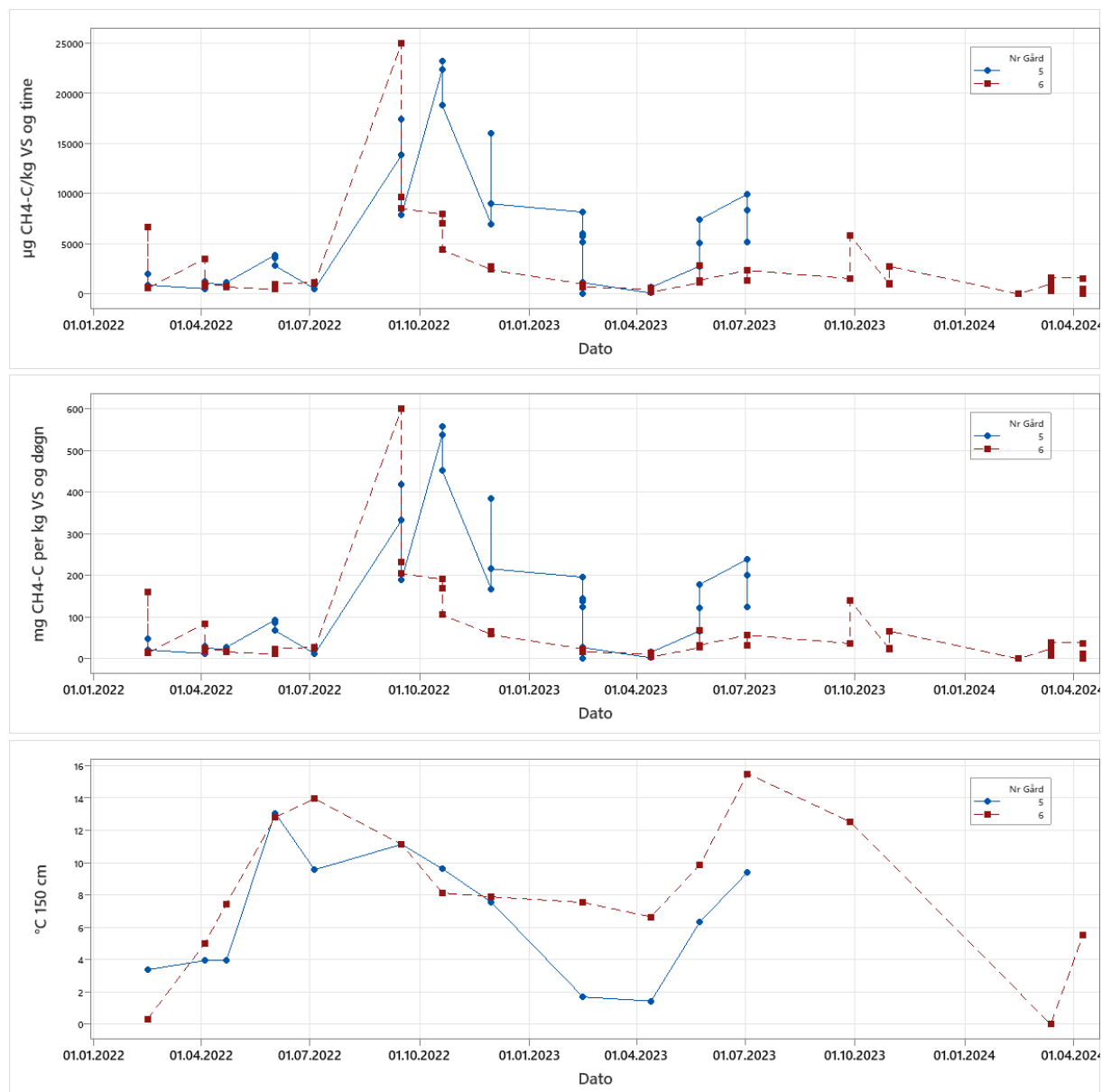
Gjødsellager 5.

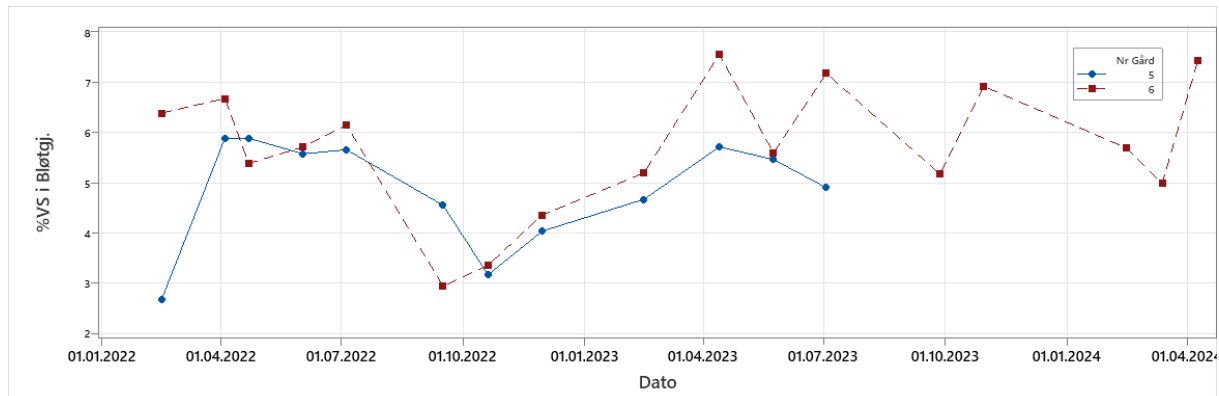
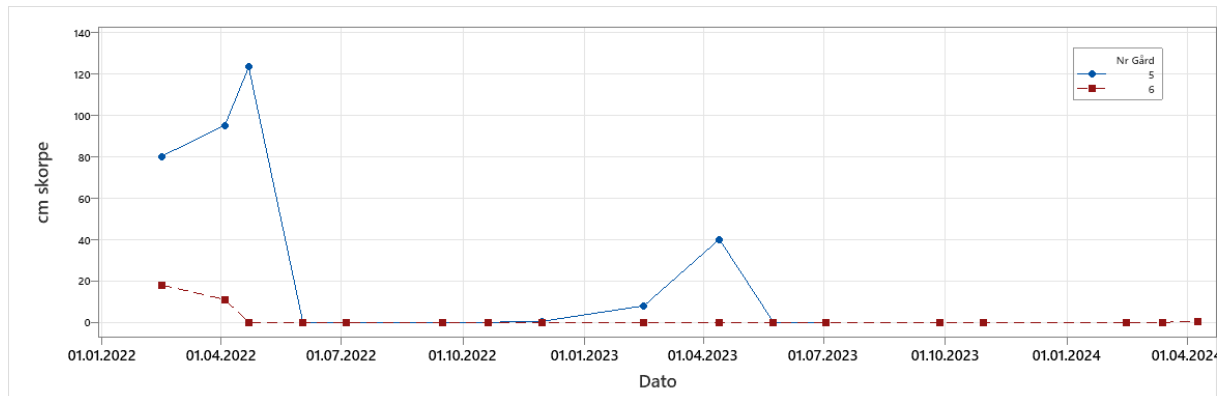
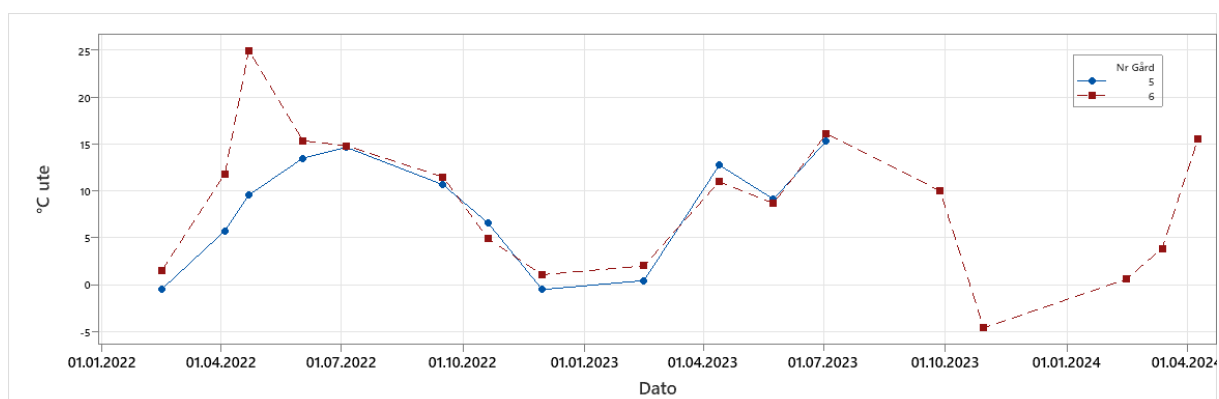
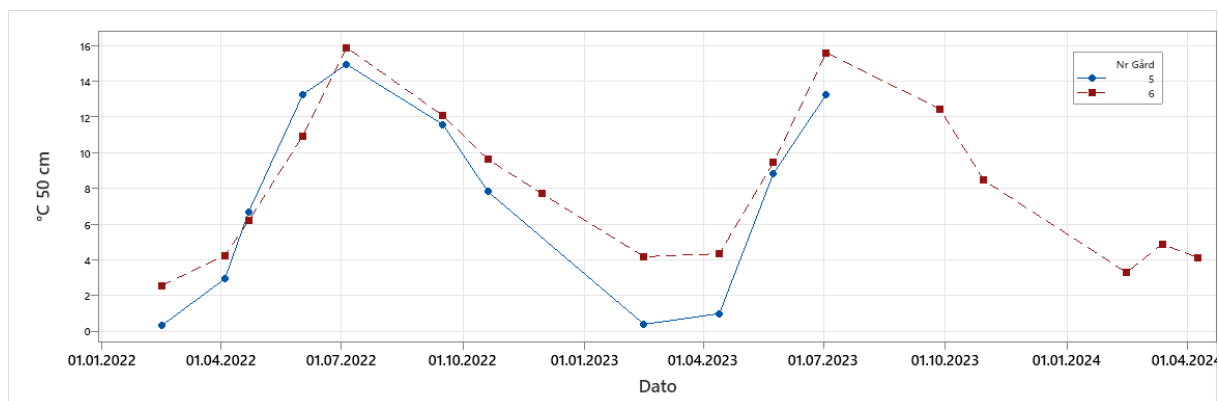


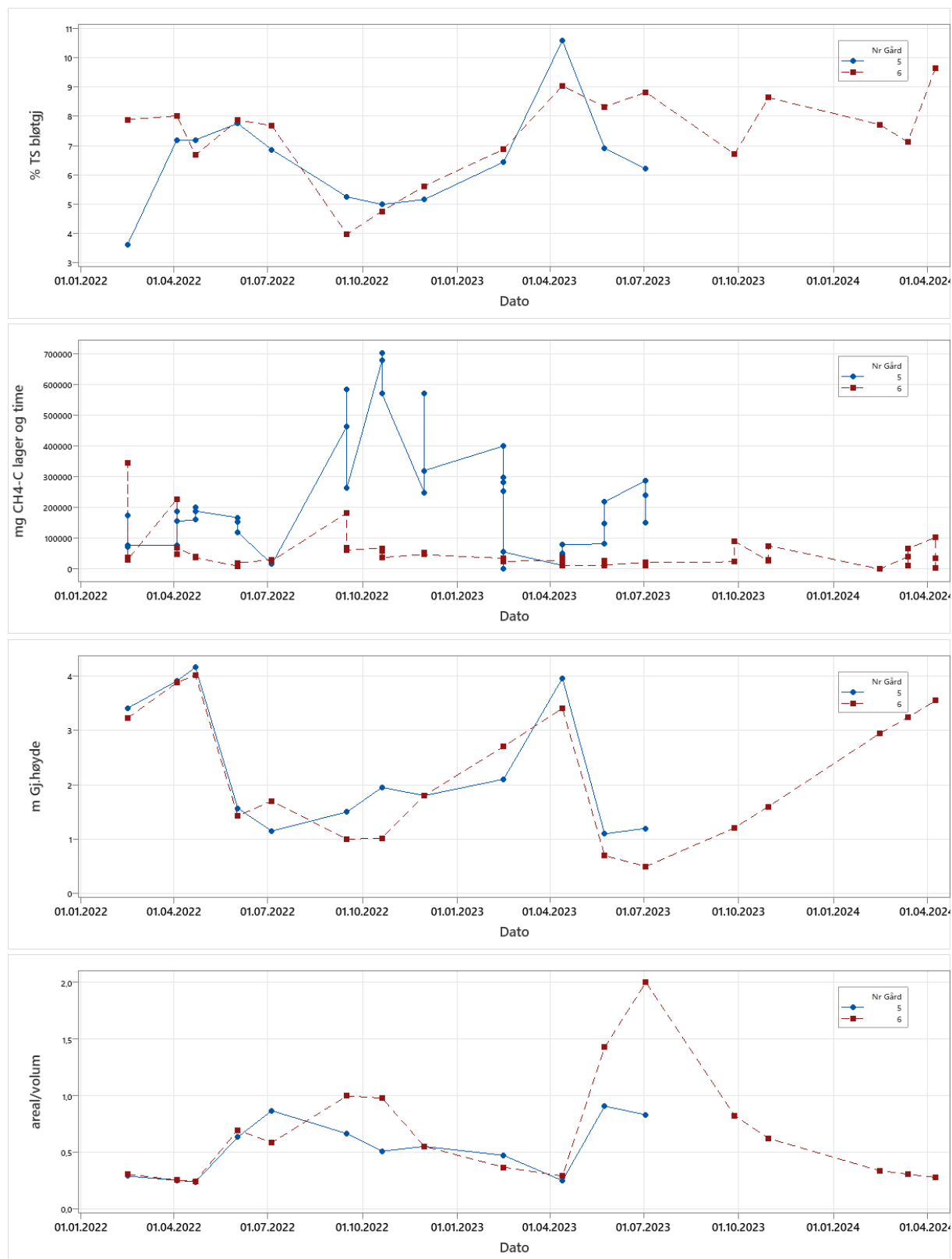
Gjødsellager 6.

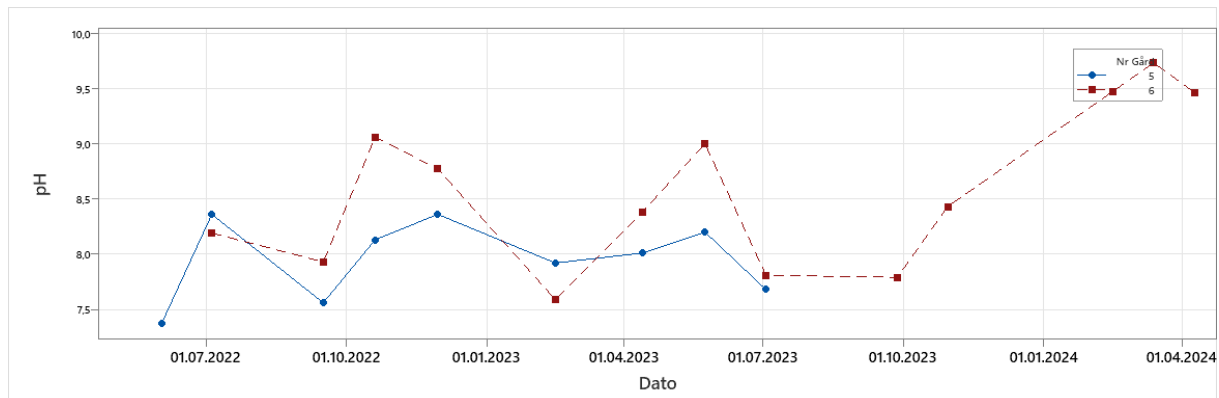


Gjødsellager 5 og 6



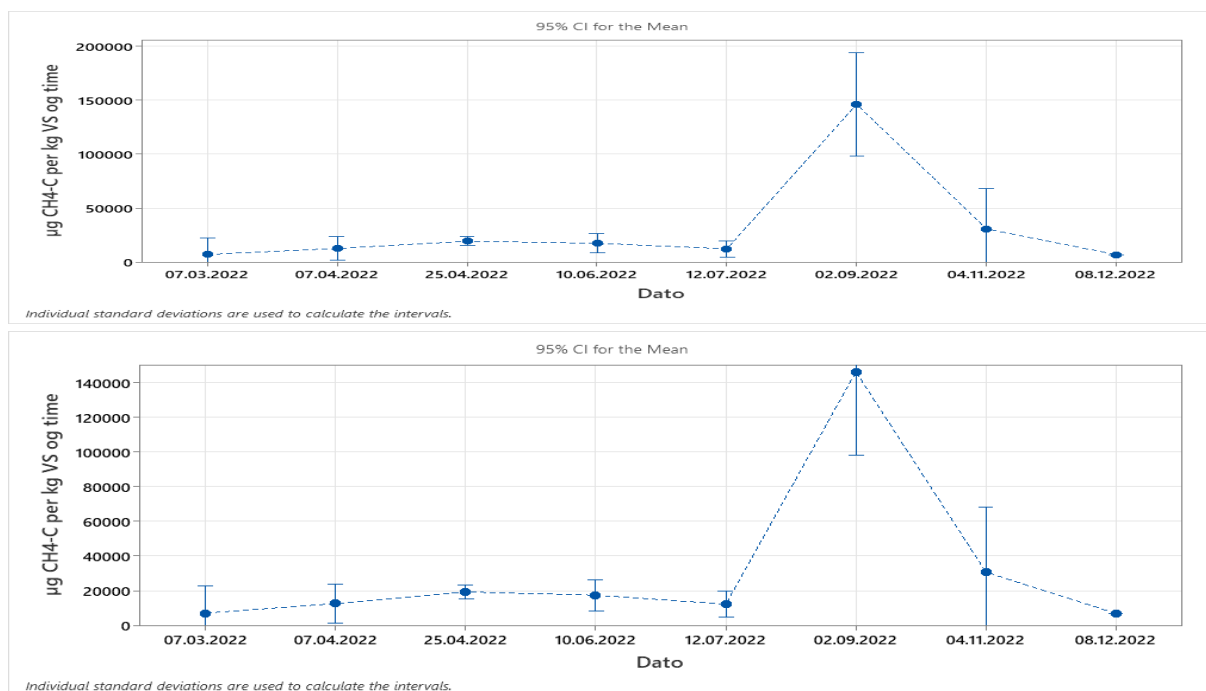


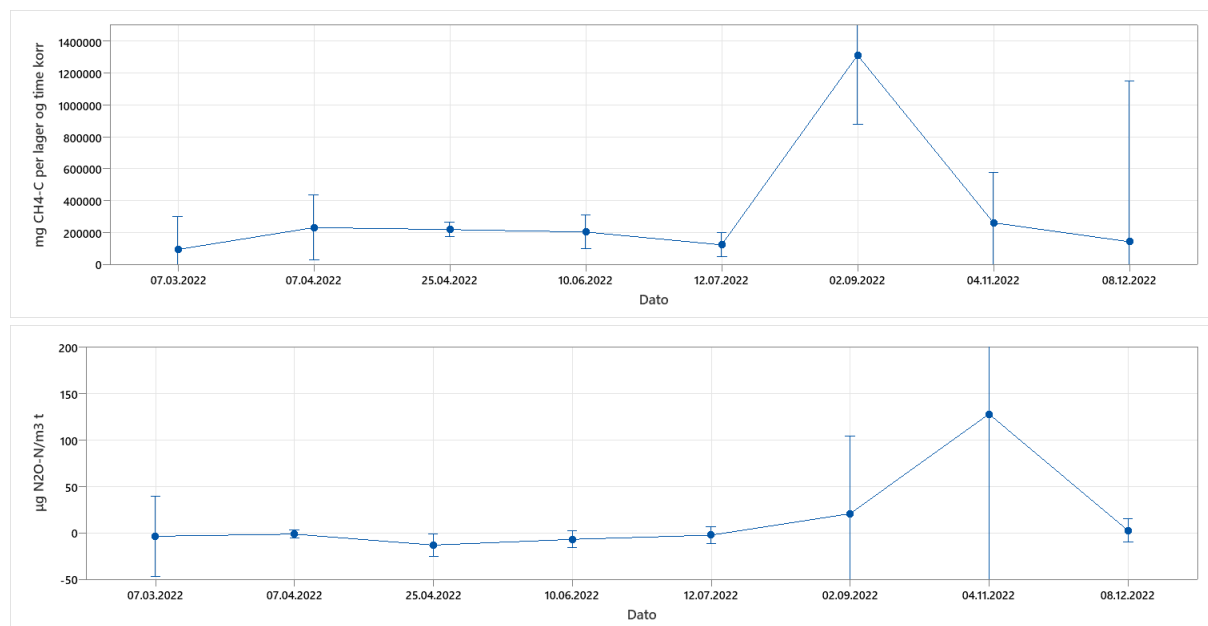




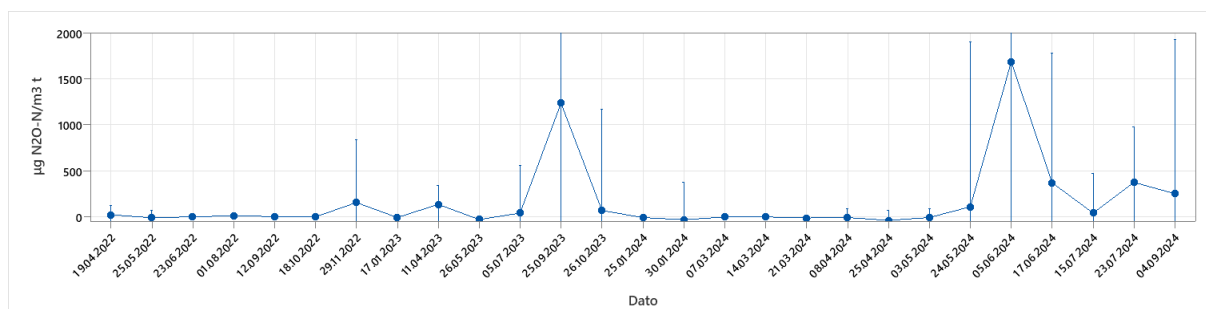
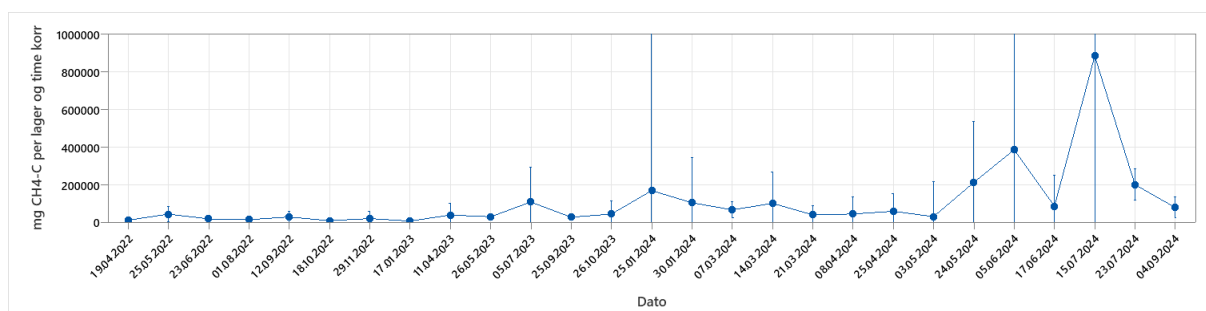
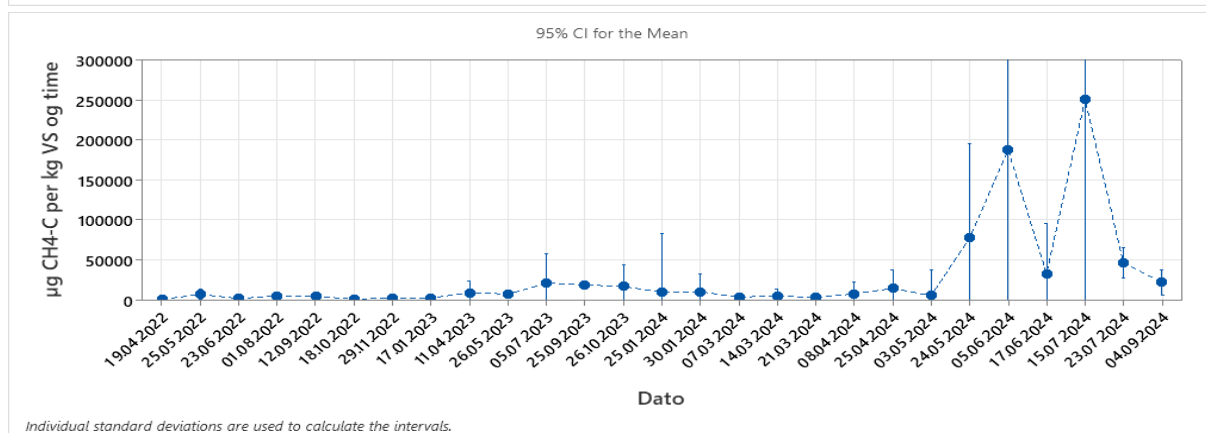
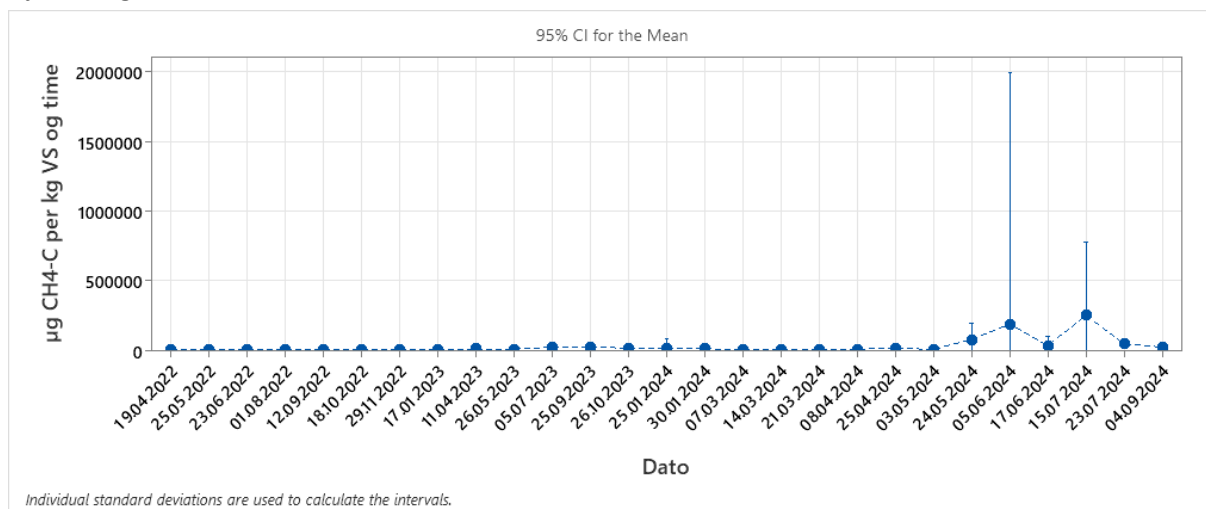
10.1.3 Gårder med kum med biorest, ny gjødsel ovenfra, to gårder

Gård nr 7 med plany dekke,

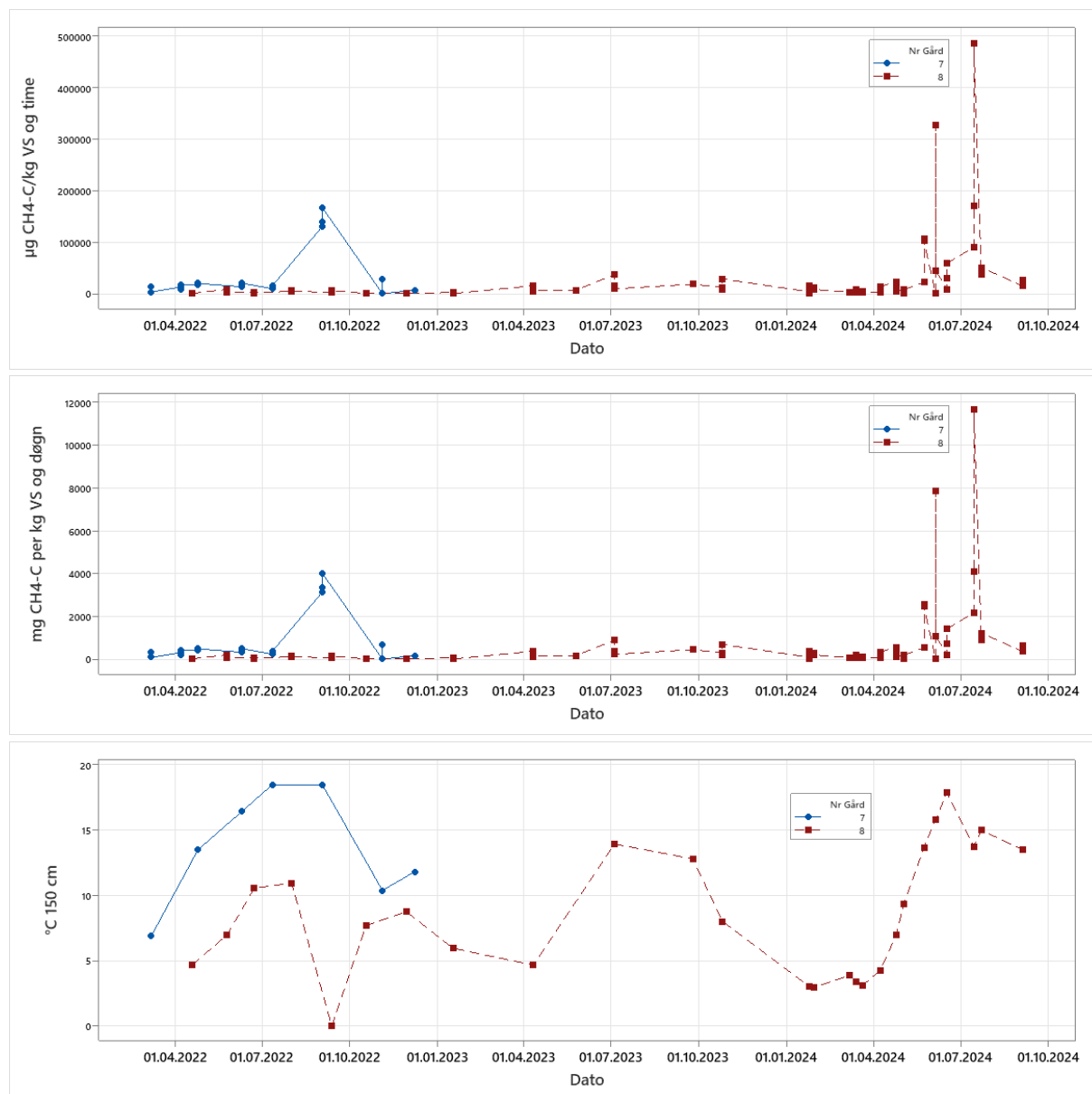


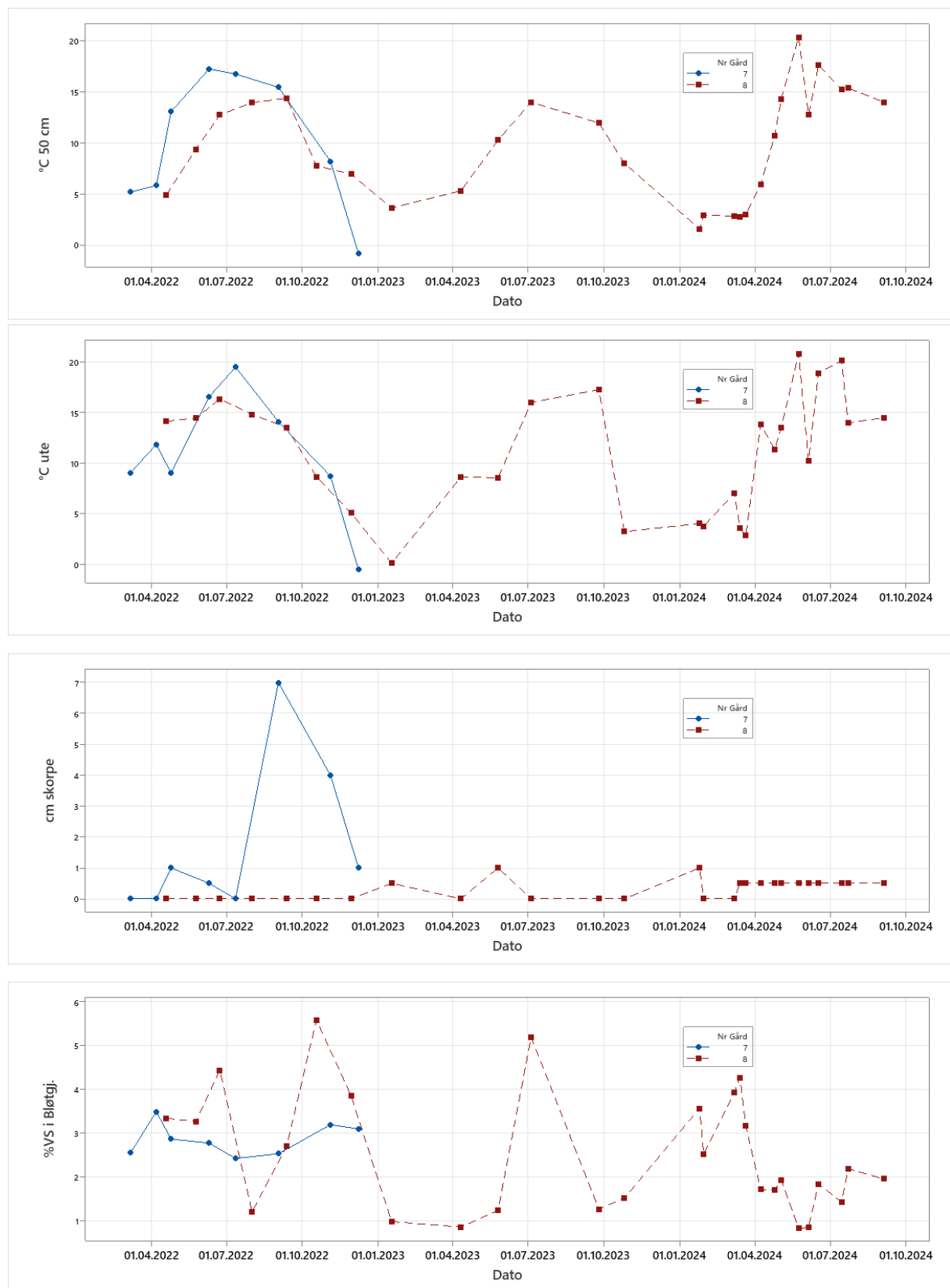


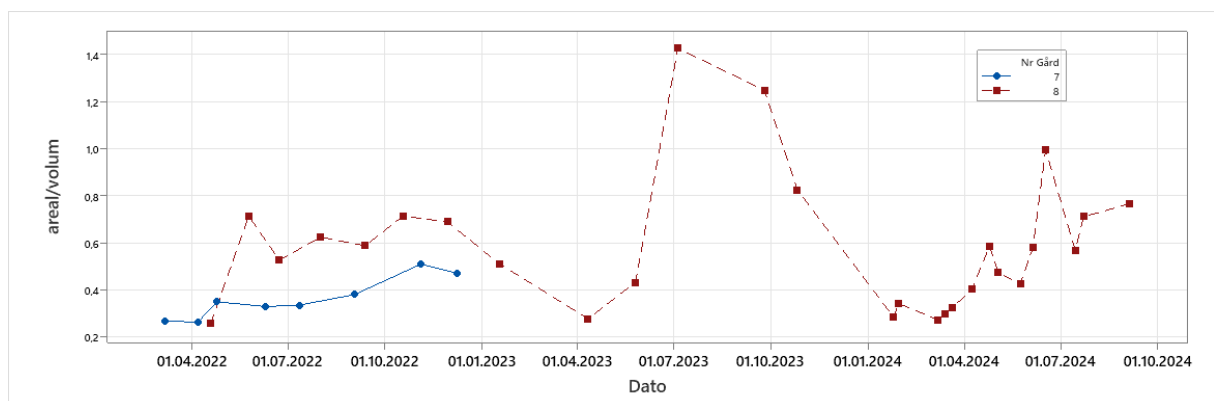
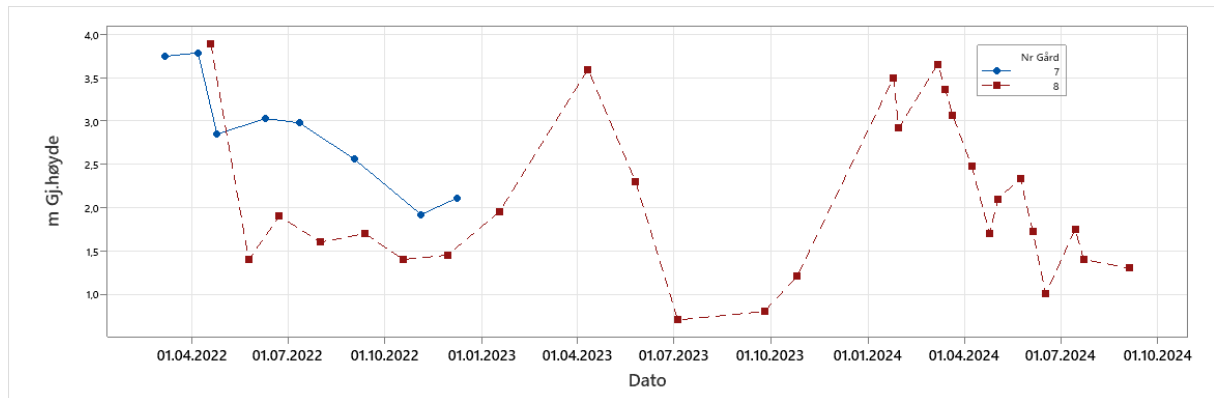
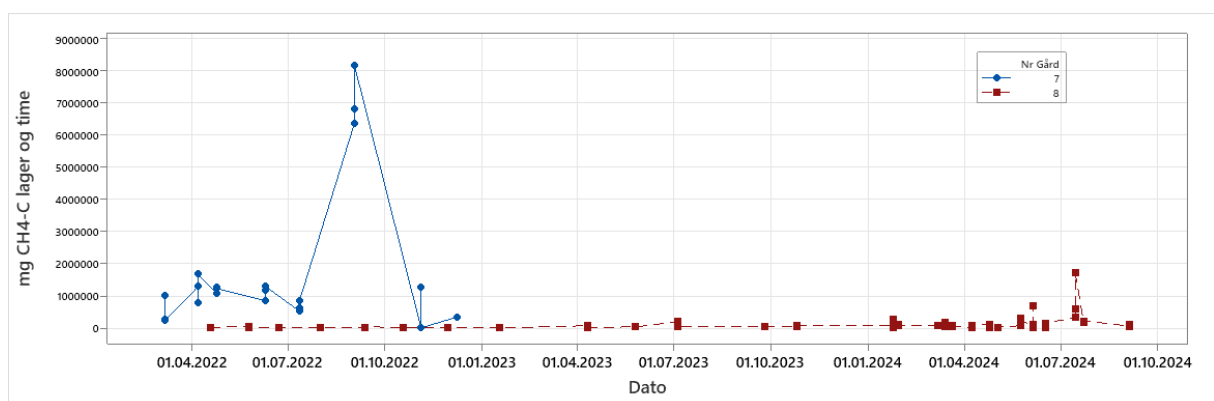
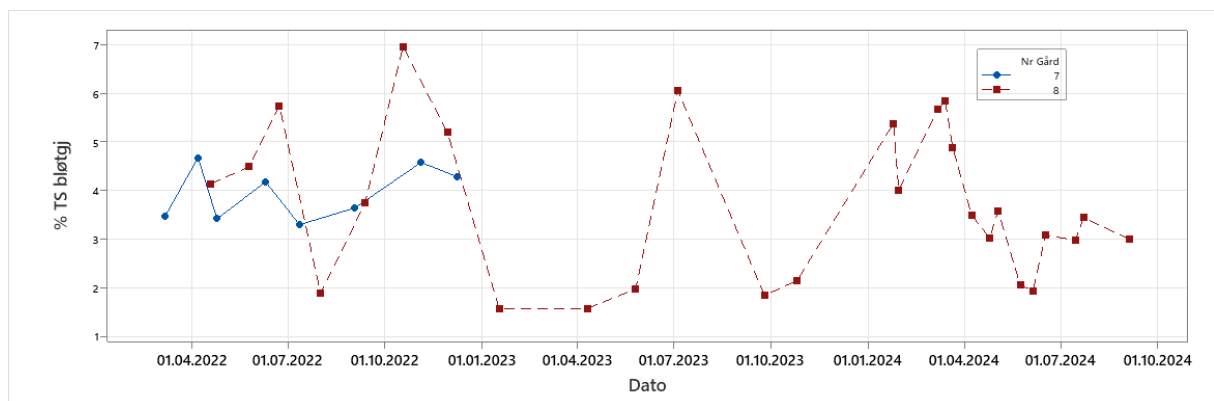
Gjødsellager nr 8 med PVC-tak

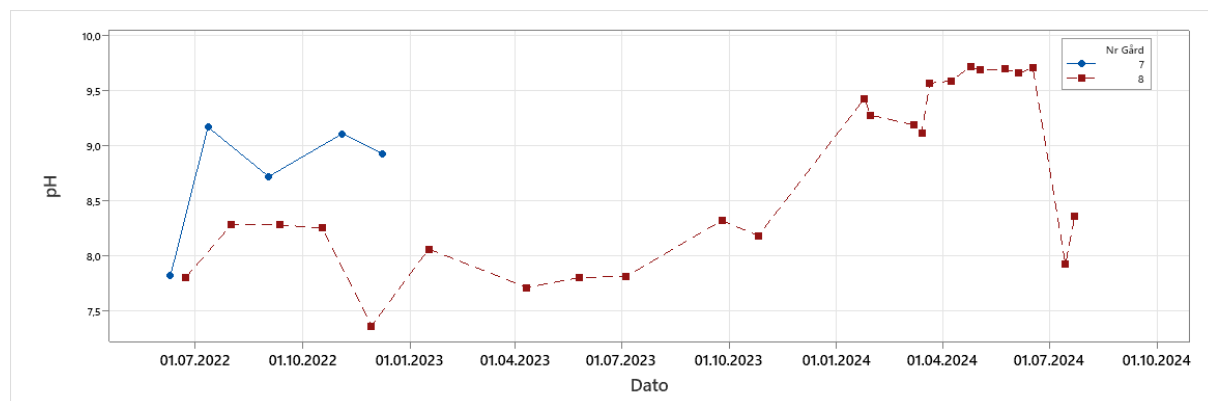


Gjødsellager 7 & 8.











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