



Åtgärder för att minimera växthusgasutsläpp från lager med rötad och orötad gödsel

Measures to minimize greenhouse gas emissions from slurry storage

Lena Rodhe, Adam Alverbäck, Johnny Ascue, Mats Edström, Åke Nordberg, Leticia Pizzul och Marianne Tersmeden

Åtgärder för att minimera växthusgasutsläpp från lager med rötad och orötad gödsel

Measures to minimize greenhouse gas emissions from slurry storage

Lena Rodhe, Adam Alverbäck, Johnny Ascue, Mats Edström, Åke Nordberg, Leticia Pizzul och Marianne Tersmeden

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2018:18

ISBN: 978-91-88695-53-6

Uppsala

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	4
Summary	5
1 Introduktion	6
1.1 Motiv och mål	6
1.2 Bakgrund.....	6
1.3 Identifierade åtgärder	8
2 Material och metod	9
2.1 Utröttningsgradens betydelse för metan- och lustgasemissioner (år 1).....	9
2.1.1 Biogasanläggning och gödselslag	9
2.1.2 Gödselhämtning och fyllning av behållare i pilotanläggning samt små flaskor	10
2.1.3 Emissionsmätning av klimatgaser i pilotskala (3 m ³ behållare).....	11
2.1.4 Laboratorieskala	12
2.2 Täckning av lager (år 2)	13
2.2.1 Studie 1: Test av olika behandling av fastgödselyta	13
2.2.2 Studie 2. Påverkan på svämtäcke, minimera lustgasemissioner (försöksgård 1).....	14
2.2.3 Studie 3. Påverkan av tak på mikroklimatet i lager (försöksgård 2).....	17
2.2.4 Studie 4. Värmebalans för lager med rötad gödsel, vår	17
2.3 Surgörning av gödsel (år 3).....	18
2.3.1 Gödsel.....	19
3 Resultat	21
3.1 Utröttningsgraden (år 1)	21
3.1.1 Biogasproduktionen vid anläggning.....	21
3.1.2 Egenskaper hos gödsel och rötrest	22
3.1.3 Emissioner från pilotskala.....	23
3.1.4 Metanproduktion i laboratorieförsök, inverkan av temperatur.....	27
Sammanfattning av resultaten år 1	28
3.2 Täckning av lager (år 2)	28
3.2.1 Egenskaper hos gödsel och rötrest	28
3.2.2 Studie 1: Test av olika behandling av svämtäcke	29
3.2.3 Studie 2: Påverkan på svämtäcke, minimera lustgasemissioner (försöksgård 1).....	29
3.2.4 Studie 3: Påverkan av tak på mikroklimatet (försöksgård 2).....	33
3.2.5 Studie 4. Värmebalans för lager med rötad gödsel, vår	33

3.2.6	Sammanfattning av resultaten år 2	34
3.3	Surgörning av gödsel (år 3).....	35
3.3.1	Egenskaper hos gödsel och rötrest	35
3.3.2	Surgörning och syraåtgång.....	36
3.3.3	Lagringsförhållanden	39
3.3.4	Emissioner	40
3.3.5	Sammanfattning av resultaten år 3	43
4	Sammanfattande diskussion	44
5	Sammanfattande slutsatser.....	46
6	Referenser	48

Förord

I föreliggande treåriga studie (2015 – 2017) har emissioner av växthusgaserna metan och lustgas från lager med flytgödsel under svenska förhållanden studerats. Jordbruksverket har finansierat studierna inom ramprogram för försöks- och utvecklingsfrågor, med utgångspunkt från miljö kvalitetsmålet Begränsad klimatpåverkan. Under första året av jordbruksverkets finansiering av dessa frågor var medlen avsedda för att täcka kunskapsluckor inom området rötning av stallgödsel och metanläckage, för att underlätta utvärderingen av gödselgasstödet.

Vid RISE Jordbruk och livsmedel (f.d. JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik) har seniorforskare Lena Rodhe varit projektledare och ansvarat för upplägg, genomförande av studierna och rapporteringen. Studierna har planerats och genomförts tillsammans med kollegierna senior forskare Åke Nordberg, projektledare Mats Edström, laboratorieingenjör Johnny Ascue, forskare Letticia Pizzul och försöksteknikerna Marianne Tersmeden och Anders Ringmar. Vid utveckling av mätteknik för fullskalelager har även biträdande projektledare Adam Alverbäck bidragit med mätteknisk kunskap och ingenjör Magnus A. Holmgren, RISE Resurseffektiva system och tjänster, med utvärdering av mätutrustningen.

En förutsättning för att kunna utföra studierna har varit medverkan från lantbruksföretagare, som välvilligt ställt upp med information och tillgängliggjort både orötad och rötad stallgödsel till försöken. Stort tack till VD Lennart E. Bengtsson och ladugårdsförman Jörgen Johansson på Wapnö AB, lantbrukare Jon och Lars Mattsson på Nyvla gård, försökstekniker Claes Davidsson tidigare vid Lövsta biogasanläggning och lantbrukare Ulf Andersson, Olpers gård. Utan er medverkan hade det varit svårt att göra så verklighetsnära studier!

Projektet har haft en ”dynamisk” referensgrupp, med olika deltagare. Värdefulla synpunkter har erhållits från Maria Berglund, Hushållningssällskapet Halland; Anders Mathiasson, tidigare VD Energigas Sverige; Elin Lindvall, Miljöregelenheten, gödselgasstödet SJV; Magnus Bång, SJV; Camilla Lagerkvist Tolke, Rådgivningsenheten, kompetensutveckling SJV; Sara Bergström Nilsson, Hushållningssällskapet Halland och Tore Sigurdsson, Kristianstad Biogas AB, som representant för Avfall Sverige.

Vi vill rikta ett stort tack till alla de som på olika sätt bidragit till genomförandet av studien!

Uppsala i februari 2018

Leif Lundin

Enhetschef RISE Jordbruk och livsmedel

Sammanfattning

Kunskap om effektiva, funktionella och ekonomiska åtgärder krävs för att säkerställa små utsläpp av växthusgaser från lager med både orötad och rötad gödsel. I detta treåriga projekt har olika tänkbara åtgärder i flytgödsellager studerats genom mätning av växthusgaserna metan och lustgas under sommarförhållanden. Åtgärder som förlängd utrötningstid och surgörning av gödsel med svavelsyra, har utvärderats i RISE pilotskaleanläggning för lagring av flytgödsel. Åtgärder för att minska lustgasemissioner bildat i svämtäcke på gödselyta i ett fullskalelager har studerats på gårdsnivå. Kompletterande teoretiska beräkningar har utförts för att bedöma effekten av att täcka flytgödsellager samt laboratoriestudier av temperaturens påverkan på metangasemissionerna.

Grundläggande är att **temperaturen har stor betydelse**, vilket visades i laboratorieskalan. Vid ökad temperatur ökade metanproduktionen exponentiellt för rötad gödsel medan för orötad gödsel var ökningen betydligt mindre. De teoretiska värmebalansberäkningarna för lager med gödsel visade att beskuggning av gödselytan eller täckning av lager med vitt tak bör kunna reducera denna uppvärmning kraftigt på våren eftersom värmeinstrålningen från solljus till gödsellager kan förklarade största delen av gödselns uppvärmning.

Studierna under första och sista året visade att metanemissionerna var signifikant **större från gödseln när den var rötad än om den var orötad**. Sammanlagda förlusterna av metan var 2,5 respektive fyra gånger så höga från den rötade gödseln under sommarlagringarna (ca fyra månader). Det betyder att det är speciellt viktigt att sätta in åtgärder vid lagring av rötad gödsel för att begränsa utsläppen av metan och därmed minska klimatpåverkan.

En åtgärd för att få lägre metanemissioner från den rötade gödseln är att **förlänga utrötningstiden**, dvs. den hydrauliska uppehållstiden i rötkammaren. Studierna år 1 visar att vid en fördubblad uppehållstid, 48 dagar istället för 24 dagar, minskade metanemissionerna från lagret med 30 procent. På gårdar med röttningsanläggningar är ett **gastätt tak med uppsamling av biogasen** också en bra åtgärd för att effektivisera anläggningen och förhindra utsläpp av klimatgaser från lagret.

Surgörning av flytgödsel med svavelsyra praktiseras främst i Danmark för att minska ammoniakavgången från flytgödsel, i stall, lager och vid spridning. Resultaten visar att det är en mycket effektiv metod för att minimera metangasemissionerna från lager med en reduktion med mer än 90 procent både för orötad och för rötad gödsel. Speciellt för gödselslag där det inte bildas naturligt svämtäcke kan surgörning vara intressant för att minska både ammoniak- och metanemissioner.

Åtgärder som surgörning av svämtäcket för att minska lustgasemissioner visade sig inte behövas eftersom lustgasemissionerna var relativt låga, trots att svämtäcket var bortåt en halv meter tjockt. Den finhackade halmen som användes som strö, bildade ett slätt och tätt svämtäcke på gödselytan vilket troligen hämmande lustgasbildningen, till följd av att luften inte kunde penetrera skiktet. **Så finhackningen av halmströ kan eventuellt vara i sig en tänkbar åtgärd**, vilket också kan minska ströåtgången.

Metanproduktionen från en rötkammare är ofta svår att mäta, och beräknas därför ofta indirekt utifrån producerad elproduktion. Ett exempel på nyckeltal för att visa klimateffektiviteten hos anläggningen visas där metanemissionerna från lager under sommaren var 10,2 % av producerad mängd metan från rötkammare vid enstegsrötning under 24 dagar respektive 5,5 % vid tvåstegsrötning under 48 dagar. På årsbasis blir procenttalen betydligt lägre eftersom emissionerna är låga under vintern.

Summary

Ensuring low emissions of greenhouse gases from both undigested and digested animal slurry in storage requires a knowledge of effective, functional and economic measures. This three-year project has studied various potential measures for use in slurry storage. The greenhouse gases methane and nitrous oxide have been measured under summer conditions. Measures such as extended digestion time and acidification of slurry with sulfuric acid have been evaluated in a RISE pilot-scale plant for slurry storage. Measures to reduce nitrous oxide emissions formed in floating crust in a full-scale storage have been studied at farm level. Complementary theoretical calculations have been carried out to assess the effect of covering slurry stores. The impact of temperature on methane emissions has been studied in the laboratory.

The fundamental point demonstrated on the laboratory scale is that the **temperature is highly significant**. As the temperature rose, methane production increased exponentially for digested slurry. For undigested slurry, the increase was considerably less. Most of the heat gained by the slurry can be attributed to solar radiation. Theoretical thermal balance calculations for slurry in storage indicated that it should be possible to reduce this heating significantly in spring by shading the slurry surface or provide the storage with a white roof.

The studies in years 1 and 3 showed that methane emissions were significantly **greater from digested than from undigested slurry**. The total loss of methane from digested slurry was 2.5 and four times higher, respectively, during summer storage (approx. four months). It is therefore particularly important to implement measures to limit methane emissions from digested slurry in storage, thereby reducing the impact on the climate.

One way to achieve lower methane emissions from digested slurry is to **extend the duration of digestion**, i.e. the hydraulic retention time in the digester. The studies in year 1 showed that doubling the retention time from 24 to 48 days reduced methane emissions from storage by 30 percent. At farms with digestion plants, a **gas-tight roof with biogas collection** is also an effective way to make the plant more efficient and prevent emissions of greenhouse gases from storage.

Acidification of slurry with sulfuric acid is practiced in Denmark, to reduce ammonia emissions from slurry in housing, in storage and during spreading. The results show that it is also a very effective method for minimizing methane emissions from storage, with a reduction of more than 90 percent for both undigested and digested slurry. Acidification may be of interest as a way of reducing emissions of both ammonia and methane, particularly for types of slurry that do not naturally form a floating crust.

Measures such as acidification of the floating crust to reduce nitrous oxide emissions did not prove to have effect because nitrous oxide emissions were relatively low, despite the floating crust being nearly half a metre thick. The chopped straw used for litter formed a smooth and dense floating crust on the surface of the slurry, and probably inhibited nitrous oxide formation because air was unable to penetrate the layer. **Chopped straw litter in itself could therefore be a potential measure**. This might also reduce straw consumption.

Methane production from a digester is often difficult to measure and is therefore often calculated indirectly from the electricity produced. An example of key indicator for the climatic efficiency of the plant is given. For storage in summer, 10.2% of the methane produced was emitted during one-stage digestion over 24 days, and 5.5% during two-stage digestion over 48 days. The annual percentages are considerably lower because of low emissions in winter.

1 Introduktion

1.1 Motiv och mål

Växthusgaserna metan och lustgas kan avgå från lager med stallgödsel. Faktorer som temperatur och gödselegenskaper kan påverka emissionerna. Metanemissionerna stiger vid ökad temperatur och lustgasemissioner uppstår när det finns porösa svämtäcken. Rötad gödsel kan vid ogynnsamma förhållanden, som exempelvis under sommaren, ge högre metanemissionerna jämfört med orötad gödsel. Det innebär att klimatnyttan med rötning av stallgödsel riskerar att förminskas eller i värsta fall försvinna helt vid stora utsläpp. Kunskap om funktionella och kostnadseffektiva åtgärder krävs för att säkerställa små utsläpp av växthusgaser från lager med både orötad och rötad gödsel. Det finns också ett stort behov av data avseende emissioner från lager med rötad gödsel, med och utan åtgärder för att kunna värdera klimatnyttan med gödselrötning t.ex. i livscykelstudier (LCA).

Målen med projektet var att:

- Bestämma metan- och lustgasemissioner från rötad gödsel med avseende på olika utrotningsgrader dels i förhållande till producerad biogas, dels i jämförelse med orötad gödsel.
- Identifiera faktorer som påverkar effektiviteten och utrotningsgraden i befintliga biogasanläggningar som rötar stallgödsel, samt föreslå lämpliga nyckeltal och analyser för bedömning av effektivitet och utrotningsgrad.
- Värdera olika tekniska åtgärder för att minska läckaget av växthusgaser vid stallgödselrötning med avseende på effekt, funktion och ekonomi, samtidigt som gällande krav på begränsad ammoniakavgång från lager uppfylls.

1.2 Bakgrund

Stallgödsel är en viktig växtnäringskälla inom lantbruket, samtidigt som hanteringen innebär utsläpp av växthusgaser (metan och lustgas) samt växtnäringsläckage både i form av ammoniak i gasform till luft och i vätskefas till omgivande vatten. Ammoniakavgång bidrar till försurning och till övergödning av naturområden på land, sjöar och hav. Ammoniak ger också indirekt bildning av lustgas, vilket bidrar till den globala uppvärmningen. Hantering av stallgödsel i jordbruket genererar växthusgaserna metan (CH_4) och lustgas (N_2O), vars klimatpåverkan under de kommande 100 åren (global warming potential; GWP100) bedöms motsvara 25 respektive 298 koldioxidekvivalenter (CO_2e) enligt "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC, 2007). Det svenska jordbrukets växthusgasutsläpp år 2011 omräknat till koldioxidekvivalenter bestod till 10 % av utsläpp från lagring av stallgödsel (NV, 2013), där metan kommer främst från flytgödsel och lustgas från fastgödsel.

Växthusgasen CH_4 bildas under syrefria (anaeroba) förhållanden från biologiskt nedbrytbart material, t.ex. i flytgödsel. Den mikrobiella produktionen av CH_4 påverkas främst av närvaro av aktiv mikroflora, tillgången på omsättbart organiskt material och olika miljöfaktorer. Vid hantering av stallgödsel är det främst från flytgödsellager, som CH_4 avgår. Under sommaren avgår väsentligt större mängder metan från flytgödselbehållare än under vintern, vilket visats genom mätningar i Österrike (Clemens m. fl., 2006) och i Sverige (Rodhe m.fl., 2008). Detta beror på att förhöjd temperatur i gödseln stimulerar metanbildning (Clemens m. fl., 2006; Sommer m. fl., 2007).

Täckning av flytgödselbehållare är en effektiv åtgärd för att minimera ammoniakavgången (Sommer m.fl., 1993). Ett annat sätt är att surgöra gödseln, vilket förutom minskad ammoniakavgång också minskar metanbildningen (Petersen m.fl., 2012; 2014; Misselbrook m.fl., 2016). Vid JTI-försök sänktes pH i flytgödsel till $< 5,4$ med fosforsyra varvid metanbildningen avstannade helt (Rodhe & Pell, 2005). Porösa svämtäckten ökar tillgången till syre vilket dels kan leda till mikrobiologisk oxidering av metan, dvs. en metanreducerande effekt, dels också till stimulering av lustgasbildning, vilket kan öka lustgasemissioner (Clemens m. fl., 2006; Rodhe m.fl., 2012). Andra pilotskalestudier av emissioner från lagrad rötad nötflytgödsel där behållarna var utan eller med tak (5 cm ovan gödselytan, dvs. ej gastätt), visade att med tak uppstod lustgas under sommaren (Rodhe m.fl., 2013; 2014), men inte när tak saknades. Ett tak skapar ett annat mikroklimat närmast gödselytan jämfört med om lagret saknar tak, eftersom det utestänger regn och solinstrålning. Samtidigt förhindras evaporation och luftutbyte. För att kunna fastställa hur metan- och lustgasemissioner påverkas av verkliga förhållanden t.ex. svämtäckets tjocklek och fuktighet samt mikroklimatet under plasttak på flytgödsellager behövs även studier i fullskala.

Lustgas bildas när ammoniumkvävet i gödseln omvandlas via nitrifiering och denitrifiering, där det första steget kräver tillgång till syre. Lustgasemissioner från lager relateras ofta till ytan (m^2) och presenteras därför t.ex. som $\text{g N}_2\text{O-N}$ per m^2 och dag (Sommer m.fl., 2000). IPCCs expertgrupp bedömer att det inte avgår någon N_2O från flytgödsel förutom när det finns ett naturligt svämtäcke. Då anger de emissionsfaktorn 0,5 % av totalkväve (Tot-N) i gödseln, samma som för fastgödsel (IPCC, 2006). Sommer m.fl. (2000) fann att nötflytgödsel med delvis uttorkat svämtäcke gav upphov till N_2O -emissioner under sommaren. Under hösten, då svämtäcket var vattenmättat, uppstod det däremot inga N_2O -emissioner. Vid årslånga pilotskalestudier av lagrad nötflytgödsel med halmsvämtäcke (Rodhe m.fl., 2008) respektive svinflytgödsel med halmsvämtäcke (Rodhe m.fl., 2012) bildades det N_2O -emissioner i svämtäcket i svinggödseln men inte i nötgödseln. Nötflytgödseln är till sin natur mer tixotrop än svinflytgödseln och antagligen bildade den en helhet med halmen, medan svämtäcket i svinggödseln var poröst vilket luften (syre) kunde penetrera.

År 2013 rötades det ca 573 000 ton gödsel i Sverige (Energimyndigheten, 2014) vilket är mindre än 3 % av den totala gödselproduktionen och det utgörs nästan uteslutande av flytgödsel. På gårdsanläggningar praktiseras främst rötning vid ca 37°C , s.k. mesofil rötning, där uppehållstiden i rötkammaren vanligtvis ligger över 30 dagar (Ahlberg-Eliasson m.fl., 2017). Vid rötning av gödsel förändras gödselns egenskaper. Den rötade gödseln innehåller i stort sett samma mängd kväve som den ingående gödseln, men den rötade gödseln har ofta en något större andel kväve i lättillgänglig form, dvs. som ammoniumkväve (NH_4). Detta är bra ur växtnärings synpunkt, men det ökar även risken

för förlust av kväve i form av ammoniak. Den rötade produkten har också ett högre pH (kring 8) vilket ytterligare gynnar ammoniakavgången under lagring och vid spridning.

Rötade produkters restgas/restmetanpotential har introducerats i Tyskland (FRN, 2010) och har där använts för att bestämma gasmängderna både vid 37 och ca 20 grader C. De beräknar den relativa restgaspotentialen, dvs. producerad mängd metan i biogasanläggningen i förhållande till restgaspotentialen som ett mått på biogasanläggningens effektivitet (FRN, 2010).

Rötad gödsel har en högre andel metanbildare än orötad gödsel, dvs. en högre metanbildningsaktivitet vilket kan innebära en risk att metangasemissionerna blir högre hos lagrad rötad gödsel än hos orötad gödsel under sommarförhållanden (Rodhe m.fl., 2013; 2014). Metanemissionerna var i dessa försök ca tre gånger högre från den rötade gödseln jämfört med den orötade. Men det kan också vara så att förbrukningen av det lättomsatta kolet under rötningen gör det svårare för metanbildarna att hitta energi och därmed bilda metan, dvs. att det blir lägre metanemissioner från rötresten än från flytgödseln under lagringen (Amon m. fl., 2006). Generellt kan åtgärder som kylning och syratillsats minska metanbildningen i lager. Andra åtgärder för att reducera metanemissionerna kan vara att säkerställa en god utrötning, t.ex. lång uppehållstid med efterrötkammare och/eller att samla upp gasen från ett gastätt lager.

Många studier visar att det går att utvinna mer biogas genom att lägga till ett efterröttningssteg. Vid kontinuerlig efterrötning av rötad nötflytgödsel visade Castillo (2012) att det gick att utvinna 19 % mer biogas från ett efterröttningssteg med samma uppehållstid som första rötkammaren (23 dagar). Uppföljning av 61 tyska biogasanläggningar som i hög grad rötade relativt lättomsättbar energigröda visade att de anläggningar som saknade efterröttningssteg i medel hade potential att utvinna ca 10 % mer biogas via efterrötning medan de anläggningar som hade efterrötning i medel kunde utvinna 5 % mer biogas från rötresten (FNR, 2010). Edström m.fl. (2014) redovisade 20 % ökad biogasproduktion vid 30 dagars satsvis efterrötning då en blandning av nötflytgödsel och kycklinggödsel samrötades. Muha m.fl. (2015) drar slutsatsen att antingen ska utrötningstiden ökas för att ge små metanemissioner från lager, eller så bör lagren täckas gastätt med uppsamling av metangas samtidigt som metanbildningen stimuleras genom temperaturhöjning och att ha fullt lager under sommaren.

Åtgången av syra för att sänka pH till viss nivå är olika för olika gödseltyper. Skillnaden mellan gödselslagen beror i stort sätt på att buffertkapaciteten är olika hos gödselslagen. Buffertkapacitet är förmågan att motstå pH-förändringar i systemet vid ökning av H⁺ eller OH⁻ (Georgacakis m.fl., 1982). Rötad gödsel har generellt en högre buffertkapacitet än orötad gödsel. Det beror främst på att halten bikarbonat och ammoniumkväve är högre och halten flyktiga fettsyror (VFA) är lägre i rötad gödsel (Christensen et al., 2013) jämfört med orötad gödsel.

1.3 Identifierade åtgärder

Baserat på tidigare kunskap identifierades nedanstående åtgärder som de mest lovande för att minimera växthusgaser från flytgödsellager och därmed säkerställa att de

klimatvinster som biogasproduktion medför inte ska reduceras genom ökade emissioner i hanteringskedjan:

1. Öka utrottningsgraden via efterrötning för att minska mängden nedbrytbart kol i lagrad rötad gödsel och därmed minska bildning av metan under lagringen.
2. Surgöra den rötade gödsel som lagras under sommaren.
3. Kylande åtgärder på befintligt lager t.ex. förse lager med duk/tak som effektivt reflekterar bort solinstrålning under vår och försommar (april-juni).
4. Påverka egenskaperna hos halmsvämtäcke t.ex. genom uppfuktning under sommaren, så lustgasbildningen minimeras.
5. Gastät lagring på den rötade gödsel som lagras under sommaren.

Bortsett från åtgärden som handlar om ökad utrottningsgrad gäller ovanstående som potentiella metoder för att minska växthusgasemissionerna även från orötad gödsel. Effekten av åtgärd 1, 2, 3, och 4 studerades i föreliggande projekt.

2 Material och metod

2.1 Utröttningsgradens betydelse för metan- och lustgasemissioner (år 1)

Under år 1 utfördes emissionsstudier i pilotskala, vilket ger möjlighet att jämföra olika gödselslag/åtgärder under samma förhållanden och som tillåter statistisk bearbetning (Rodhe m.fl., 2008). I pilotskalan mättes emissioner av växthusgaser under sommaren från försöksleden:

- A) Orötad gödselblandning (flytgödsel och hackad djupströbbädd),
- B) Rötad gödsel i ett steg, R1, i ca 24 dagar och
- C) Rötad gödsel i 2 steg, R2, ca 48 dagar.

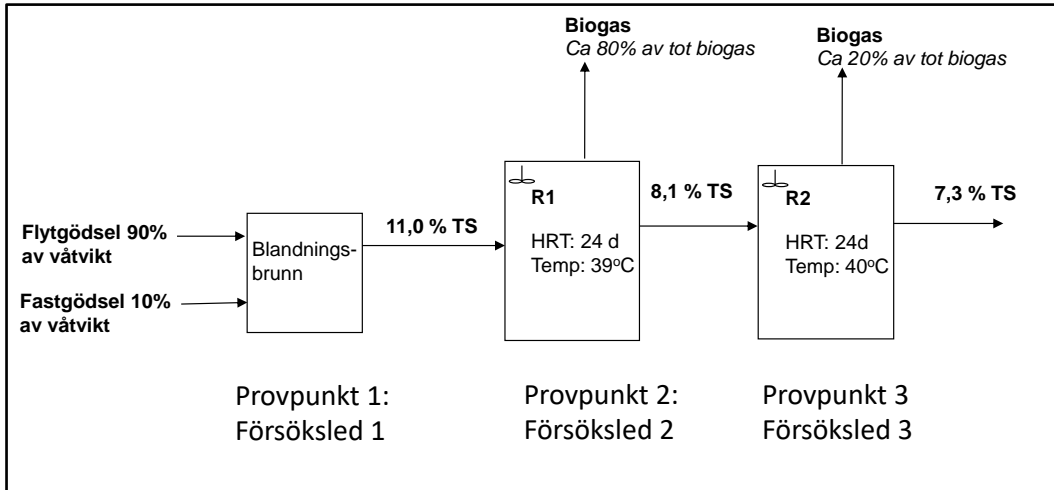
Parallellt med pilotskaleförsöket studerades i laboratorium (1 L-flaskor) påverkan på metanbildningen från samma material som i pilotförsöken vid olika konstanta temperaturer utan inympning, samt vid samma temperatur som i pilotlagren.

Den biogasanläggning, vars gödsel och rötrest användes i pilot- och laborieförsöken, karakteriseras utifrån tillgängliga driftsdata, vilka kompletterades med beräkningar för att ta fram exempel på nyckeltal för anläggningens effektivitet.

2.1.1 Biogasanläggning och gödselslag

Gödsel och rötrest hämtades från en gårdsbaserad biogasanläggning som enbart rötar stallgödsel. Gården bedriver mjölkproduktion där all producerad stallgödsel från mjölkkor och rekrytering rötas. Driftsförhållandena hos anläggningen dokumenterades vid besök och kompletterande data erhöles av gårdens personal. Flytgödsel (90 % av våtvikten) och hackad djupströgödsel (10 % av våtvikten) blandades i en blandningsbrunn innan den matades in i första röt-kammaren, Figur 1. Gödselblandningen rötades seriellt i två lika stora röt-kammare. Uppehållstiden för respektive röt-kammare var ca 24 dagar (beräknat på inflödet). Rötningstemperaturen i första röt-kammaren (R1) var ca

39°C och temperaturen i andra röt-kammaren (R2) var ca 40°C. Den organiska belastningen har för R1 beräknats till 3,85 kg VS/m³ och dygn och för R2 till 2,53 kg VS/m³ och dygn. Biogasen används huvudsakligen för kraftvärmeproduktion.



Figur 1. Schematisk bild över biogasanläggning som levererat gödsel och rötrest till försöket.

Biogasanläggningen saknade tillförlitlig gasmätare. För att kunna bedöma anläggningens effektivitet samt för att kunna relatera uppmätta metanemissioner i försöket till producerad metanproduktion vid anläggningen beräknades biogasproduktionen med en massbalansmodell baserat på uppgifter om producerad mängd elektricitet, den maximala metanbildningskapaciteten (B_0), antagandet att 80 % av totala biogasproduktionen kommer från R1 och resterande 20 % från R2 (Castillo, 2012) samt gödselanalyser, tabell 3.

2.1.2 Gödselhämtning och fyllning av behållare i pilotanläggning samt små flaskor

På morgonen mellan kl. 6-8.30 den 22 april hämtades de tre olika gödselslagen (A-C) på gården med slambil, transporterades till JTI, där lagringsbehållarna fylldes på kvällen (kl. 18.15-20.25), figur 2. Samtidigt med behållarna fylldes även gastäta enlitersflaskor (1L-flaskor), som placerades i respektive behållare på halva gödseldjupet. Innan fyllning togs representativa prover för analys av torrsustans (TS), organisk substans (VS), totalkväve (Tot-N), totalt ammoniumkväve (TAN), totalkol (Tot-C), pH och prov till satsvisa utrötningar för bestämning av den maximala metanbildningskapaciteten (B_0) vid 37 °C under 105 dagar beskriven av Rodhe m.fl. (2008). Pilotskalebehållarna fylldes i två steg för att få mer representativ gödsel, eftersom det alltid kan vara en risk med skiktningar i slambilen. Behållarna fylldes till ca 1,1 m höjd, vilket motsvarar ca 2,2 m³ gödsel.

2.1.2.1 Avslutning av lagringsstudie

Vid avslutningen av försöket dokumenterades gödselnivåer och yta som täcktes eventuellt svämtäcke, svämtäckets tjocklek mättes med meterstock, samt prover på svämtäcket togs ut i 0,1 m tjocklek, ca 0,2 x 0,2 m för bestämning av TS-halt. Därefter

rördes gödseln om och prover togs ut för analyser ur respektive behållare. Proverna analyserades med avseende på samma egenskaper som vid start av lagringen.



Figur 2. Fyllning av behållare och placering av 1 L-flaskor i stativ i behållarna på halva gödseldjupet, samt i laboratorium vid konstanta temperaturer.

2.1.3 Emissionsmätning av klimatgaser i pilotskala (3 m³ behållare)

Studierna utfördes från 22 april t.o.m. 10 september 2015 ("sommarförhållanden", ca 5 månader) i JTI:s pilotskaleanläggning för mätning av växthusgaser bestående av 9 behållare, delvis nedgrävda, figur 3 (Rodhe m.fl., 2008; 2013). Varje gödsel/rötrest-led upprepades tre gånger, dvs. tre behållare per led. Den experimentella designen var randomiserat blockförsök för att säkerställa den statistiska bearbetningen. Medeltemperaturen i pilotlagren registrerades för tretimmarsperioder uppmätta med temperaturgivare placerade 0,1 m från botten respektive 0,1 m under ytan. Väderdata hämtades från Ultuna meteorologiska station, ca 900 m från lagringsanläggningen.

Emissionerna av metan, koldioxid och lustgas mättes med s.k. slutna kamrar specifikt anpassade för denna pilotskaleanläggning (Rodhe m.fl., 2008). Ett gastätt lock placerades ca 0,2 m över gödselytan och gasprover togs ut direkt, samt efter 15 respektive 30 minuter efter förslutning i luftvolymen ovanför gödselytan. Gasproverna analyserades med avseende på CH₄, CO₂ och N₂O med gaskromatograf. Emissionerna beräknades med linjär regression från koncentrationsförändring över tid. Gasprovtagningarna upprepades 14 gånger under lagringsperioden, med start dagen efter fyllning. Provtagningen skedde något tätare i början ca en provtagning per vecka, men senare fördelades tidpunkten för provtagning relativt jämnt över tid, men mer sällan under kallare perioder. Emissionerna mellan två mättillfällen beräknades genom att ta medelvärdet för emissionerna vid de två mättillfällena och multiplicera med antalet dagar mellan mätningarna. Emissionerna summerades därefter för hela tiden för att få kumulativa värden.



Figur 3. Pilotskaleanläggningen vid första gasmätningen den 23 april, 2015.

2.1.4 Laboratorieskala

Laborariestudier utfördes för att bestämma metanbildningen vid olika temperaturer för samma gödsel och rötd gödsel som användes i pilotförsöket, figur 2. I samband med fyllning av pilotskalebehållarna fylldes gödsel och rötd gödsel (R1 respektive R2) i 1 L-glasflaskor, vilka förslöts och inkuberades utan inympning vid tre olika konstanta temperaturer (Tabell 1). Försöken genomförs med 3 paralleller för att säkerställa statistisk bearbetning.

Tabell 1. Laborariestudier av metanbildningen vid olika temperaturer (°C) för gödsel och rötd gödsel som användes i pilotförsöket år 1. Placering i rum med olika temperaturer eller i pilotlager (medeltemperaturen visas, se även tabell 4).

Placering	A) Orötd gödsel	B) Rötd gödsel, R1	C) Rötd gödsel, R2
Lab	20	20	20
Lab	15	15	15
Lab	10	10	10
Pilotlager	11,4	13,1	12,5

Laborieförsöken pågick under 140 dygn och provtagning samt analyser skedde med olika frekvenser (tätare i början och mer sällan i slutet av försöken). Inför gasprovtagningen skakades flaskorna manuellt. Gasproduktionen beräknades genom att trycket i flaskorna mättes med en digital tryckmätare (GMH 3110) utrustad med en trycksensor. Trycket konverterades därefter till normal gasvolym (1 atm och 0°C). Samtliga producerade gasvolymmer redovisas efter normalisering. Metanhalten analyserades med gaskromatograf (PerkinElmer ARNEL, Clarus 500).

2.2 Täckning av lager (år 2)

Under år 2 var huvudmålen att se om det är möjligt att med olika åtgärder påverka organiska svämtäcken i syfte att minimera växthusgasemissionerna (främst lustgas) och studera mikroklimatet under tak över gödselbehållare. Planen var också att studera rötrestlager med uppsamling av metangas, men det gick tyvärr inte pga. att studieobjekt saknades.

Tabell 2 visar en översikt av de studier som utfördes under år 2. Studie 1 gjordes i laboratorieskala och omfattade åtgärder redovisade i tabellen i figur 4. Detta låg till grund för valda åtgärder i Studie 2, som var en fullskalestudie ute på en mjölkkogård. I Studie 3 utfördes orienterande temperaturmätningar i täckt fullskalelager med rötad gödsel för att se hur taket påverkar temperaturen i luften ovan gödselytan. I Studie 4 genomfördes teoretiska beräkningar av värmeinstrålningens påverkan på gödselns uppvärmning under våren. Studie 5 med mätningar av gasmängder uppsamlat från gastätt lager fick utgå.

Tabell 2. Översikt över studier utförda år 2.

Studie	Skala, förhållanden	Åtgärd, mätning	Metod, tid
1	Fastgödsel i backar (ca 35 kg) placerade utomhus under tak.	Ingen åtgärd och 4 åtgärdsmetoder, mätning av metan- och lustgasemissioner.	Slutna kammare, 2 tillfällen. Öppen dynamisk kammare. Maj-september.
2	Nötflytgödsel i fullskala, öppet lager med tjockt svämtäcke.	Ingen åtgärd, uppfuktning, resp. surgörning av svämtäcke. Mätning av växthusgaser.	15 juni - 8 november.
3	Rötad gödsel, fullskala, täckt lager.	Temperaturmätning under och utanför tak.	-
4	Teoretisk beräkning av värmebalans för rötrestlager på våren.	-	-
5	Gastätt lager.	Ingen mätning p.g.a. brist på mätobjekt.	-

2.2.1 Studie 1: Test av olika behandling av fastgödselyta

Tjock gödsel motsvarande svämtäcke placerades i fem lådor för att senare behandla ytan på olika sätt i syfte att studera effekten på lustgas- och metanemissioner. De ingående behandlingarna visas i tabellen i figur 4. Lådinnehållen vägdes och ett samlingsprov av gödseln togs ut för senare analys (se tabell 8). Applicering av syra skedde med trycksatt doserare (figur 4), medan rapsoljan sprayades på ytan. pH mättes ca 5 cm under gödselytan.



Led	Tillsats, mängd per yta (0,17 m ²)
1) Kontroll (ingen behandling)	-
2) Rapsolja	1,1 liter
3) Vatten	1,1 liter
4) Svavelsyra (1-procentig lösning)	1,2 liter, pH<1
5) Svavelsyra (2-procentig lösning)	1,25 liter, pH<1

Figur 4. Applicering av syra på porös fastgödselbädd (motsvarande svämtäcke) och mätning av metan och lustgas med slutna kammare. Försöksled till höger.

Mätning av växthusgaser skedde vid två tillfällen med slutna kamrar (Rodhe m.fl., 2005). Den första mätningen, som startades direkt efter applicering den 26 maj, gav oklara värden och därför redovisas endast värden för andra mätningen, 6 dagar efter applicering (1 juni).

2.2.2 Studie 2. Påverkan på svämtäcke, minimera lustgasemissioner (försöksgård 1)

I fullskala mättes metan- lustgas- och koldioxidemissioner från gödsellager med svämtäcke.

Tre olika försöksled ingick:

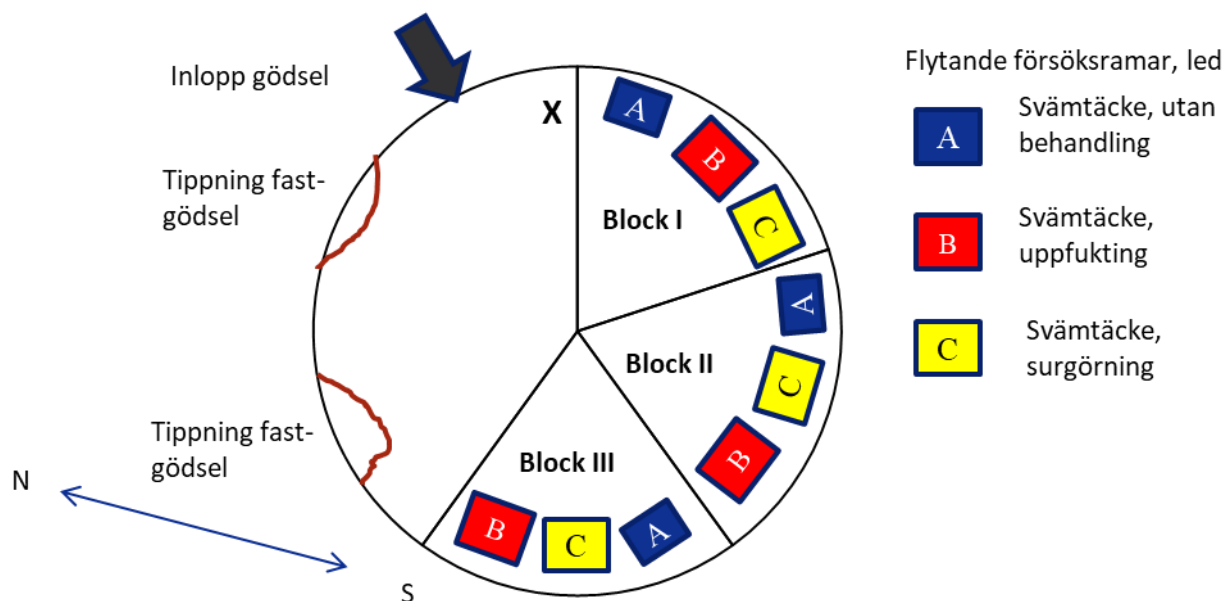
- A. Svämtäcke, utan behandling,
- B. Svämtäcke, med uppfuktning och
- C. Svämtäcke, med surgörning.

Experimentet var upplagt som ett randomiserat blockförsök, där mätramarna var placerade i tre block, se figur 5. I led B tillfördes totalt 141 liter vatten per m² fördelat över sex tillfällen över mättiden, och i led C totalt 35,5 liter svavelsyra (96-procentig) per m² fördelat över 3 tillfällen över mättiden från maj till september.

Nötflytgödsellager valdes efter kriterierna att det ska bildas ett ordentligt svämtäcke på gödselytan och att lagret skulle ligga i Uppsalas närområde. På försöksgården fanns 140 mjölkkor med rekrytering och mjölkorna gick i en kall lösdrift. Som strömedel användes finhackad halm, som hackats i fält med en Jaguarhack. Strålängdsfördelningen hos den hackade halmen bestämdes med hjälp av JTI:s sorteringsmaskin som finns beskriven av Gale & O'Dogherty (1982). Resultatet anges som halvviktslängd (mm), vilket är den längd som delar provet i två viktsmässigt lika stora delar, samt längder för övre och undre kvartil. Gödsellagret rymde 2000 m³ (3 meter djup, diameter ca 30 m). Gödselbehållaren fylldes dagligen med färsk gödsel från mjölkorna och två gånger i veckan tippades fast

gödsel från ungdjuren (skrapade gångar) ifrån norra sidan (motsatt sida till mätningssområdet), figur 5.

Prov från gödselbehållaren togs vid varje gasmätning, ca 0,5 m under gödselytan för analys av torrsubstans (TS), organisk substans (VS), totalkväve (Tot-N), totalt ammoniumkväve (TAN), totalkol (Tot-C) och pH. Efter sista mätningen togs ett gödselprov ur omblandad behållare.



Figur 5. Indelning av gödselytan i tre block, med behandlingar i slumpade smårutor: A) obehandlad yta, B) uppfuktad yta och C) surgjord yta. Blocken placerades i ena halvan av bassängen p.g.a. tippning av gödsel i behållaren på norra delen av behållaren.

Emissionsmätningar utfördes från 12 maj till 1 september 2016 (ca 3,5 månader) med 9 mätningar av växthusgaser fördelade under den tiden. Mätningarna startade efter vårspridning (ca 2 m gödsel i behållaren) och efter tre mätningar blev det ett avbrott på grund av omrörning och spridning efter första vallskörd (början av juni). Temperaturen mättes kontinuerligt i flytgödsellagret på två nivåer (0,5 och 1,5 m under ytan) på två platser (figur 2) med dränkbara temperaturloggrar (Tiny Tag Aquatic TG-4100, Intab Interface-Teknik AB, Stenkullen, Sweden). Temperaturmätningar i gödsel utfördes under tiden 11 maj till 3 juni, och från 16 juni till 7 september. Lufttemperaturen hämtades från väderstation 458: Uppsala WGS84 N=59.87999, E=17.59998.

Emissionsmätningarna utfördes med en s.k. öppen dynamisk kammare bestående av underdel (ramar nedpressade 0,1 m ned i svämtäcket) och en flyttbar överdel, figur 6. Utrustningen hade utvecklats vid RISE och måtten hos ramar och överdel samt luftflöde har valts så att de om möjligt överensstämmer med tidigare använd dynamisk kammare, beskriven av Holmgren m.fl. (2013), som uppfyller krav enligt tyska riktlinjerna vid luktmätning (VDI, 2011). Ramarnas insida var 1,03 m lång, bredden 0,53 m (0,55 m²) och höjden 0,35 m, figur 6 och 7.

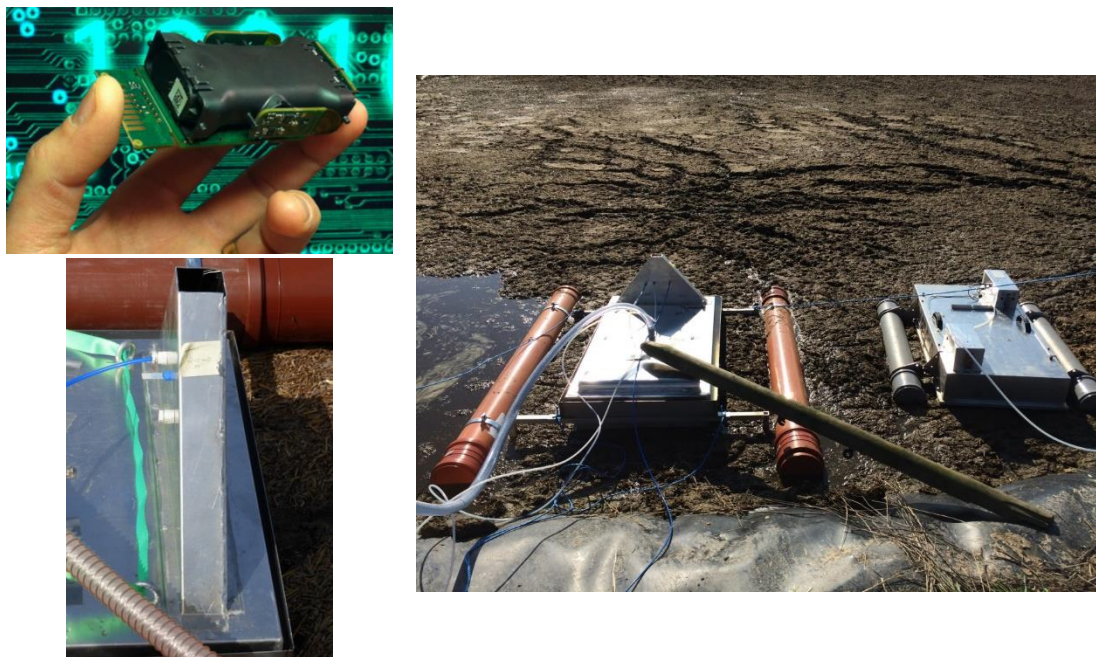
Överdelen var utformad så att luftflödet trycks in genom en spalt upptill i ena änden, luften flödar sedan sakta över ytan och går ut över hela ramens kortsida i andra änden av kammaren. Luftväxlingen i dynamiska kammaren var ca 2 ggr per minut och luften

dimensionerades för en medelhastighet av ca 2,5 m/min, dvs. 0,04 m/s över gödselytan. I kammarens utlopp togs gasprover ut via en slang för analys av metan, lustgas och koldioxid med en spruta, och gasproven fördes över till glasvialer för senare analys på gaskromatograf i laboratorium (Rodhe m.fl., 2008). För metan användes också en IR-sensor utvecklad av SenseAir AB för att kontinuerligt mäta metan-koncentrationen i utluften. När stabila koncentrationer uppnåts (balans mellan producerad och bortförd gas) under minst 20 minuter avslutades mätningen. Lustgas- och koldioxidemissioner beräknades med hjälp av analysresultat av gasproverna, medan för beräkning av metanemissionerna användes medelvärdet av data från sensorn (verifierades av GC-analyser).



Figur 6. Ram med vattenlås och flytriggar nedpressad ca 0,1 m i svämtäcket (t.v.) och ram med mät huv under mätning (t.h.). Vid nedpressning av ramen uppstod sprickor i svämtäcket i vissa ramar (t.v.). Luft blåses in (ljusgrå slang) och i utloppet (vertikal "skorsten") sugas gasprov i blå slangen till metansensor alternativt till punkt för uttagning av gasprov. Den finhackade halmen skapade ett slätt svämtäcke.

Innan försöken startades gjordes jämförande mätningar med den utvecklade utrustningen med VDI-kammaren (figur 7), vilket visade att utrustningen gav samma resultat. VDI-kammaren är främst utvecklad för luktmätning och beskrivs i en standard (VDI, 2011).



Figur 7. Överst till vänster visas IR-sensor utvecklad av SenseAir AB för att kontinuerligt mäta metan-koncentrationen, samt nederst till vänster punkten (blå slang) för utsug av luftprov från huvan. Till höger pågår jämförande mätningar mellan utvecklad dynamisk kammare (bestående av ram och huv) och VDI-kammare (en enhet, som flyttas vid mätning).

2.2.3 Studie 3. Påverkan av tak på mikroklimatet i lager (försöksgård 2)

På en försöksgård med biogasanläggning studerades temperaturer i lager med plasttak av fabrikat MPG. Vid anläggningen rötades flytgödsel från nötkreatur och svin, fastgödsel, ensilage, mjöl och potatis. I nötkreatursstallarna användes kutterspån som strö och i grisstallarna halm. Rötningen skedde vid 38°C med en uppehållstid av 51 dagar. Dagligen fylldes röt-kammaren med ca 80 m³, men ofta skedde avvikelser från dessa rutiner och därmed var det svårt att få en längre mätperiod för fylld behållare. Den studerade behållaren (nr 1) var 4 m djup och rymde 3500 m³. Temperaturstudier utfördes från 15 juni till och med 8 november, med nedsänkta temperaturgivare på 2 platser, vardera på 2 nivåer (0,5 respektive 1,5 m under ytan). Samtidigt mättes lufttemperatur under tak och utanför behållaren på skuggsidan (ca 1 m över marknivå).

2.2.4 Studie 4. Värmebalans för lager med rötad gödsel, vår

Teoretiska beräkningar av värmeförlust respektive värmeavgång för lagrad rötad gödsel under våren genomfördes för att bedöma värmebalansen. Beräkningar har utförts för ett rötrestlager med radien 18 meter som innehåller 4000 ton rötad gödsel med en medeltemperatur på 3°C i början av april. Baserat på beskrivning av de globala energiflödena i atmosfären (Solomon m.fl., 2007) kan uppvärmning av gödsellagrets innehåll beräknas. Beräkningen av värmeförlust och värmeavgång tar ej hänsyn till att värmeförlusterna är beroende av temperaturen i lagret.

Värmetillförseln till lagret sker via solinstrålning, konvektion vid ytan och från tillförd rötad gödsel. För beräkningarna gjordes följande antaganden.

För solinstrålning: 4 kWh/m² och dygn under april. Albedo (reflektionsgraden av solstrålningen tillbaka till atmosfären) för infallande solstrålning på ytan i lagret antogs vara 20 % för ett svämtäcke som exponeras mot atmosfären.

Konvektion vid ytan: Värmeövergångstalet dagtid (12 h/dygn) antogs vara 8 W/m²/°C (Peterson m. fl., 1985) med antagen medeltemperaturdifferens mellan rötad gödsel och luft på 4 °C. Nattetid (12 h/dygn) antogs värmeövergångstalet vara 6 W/m², °C med temperaturdifferens mellan rötad gödsel och luft på 2 °C.

Värme från tillförd rötad gödsel: Lagret tillförs 20 ton gödsel/dag med en temperatur på 30 °C. Specifik värmekapacitet för rötade gödseln antogs vara 4 kJ/kg, °C.

Värmeavgången från lagret sker främst via långvågigt värmefflöde.

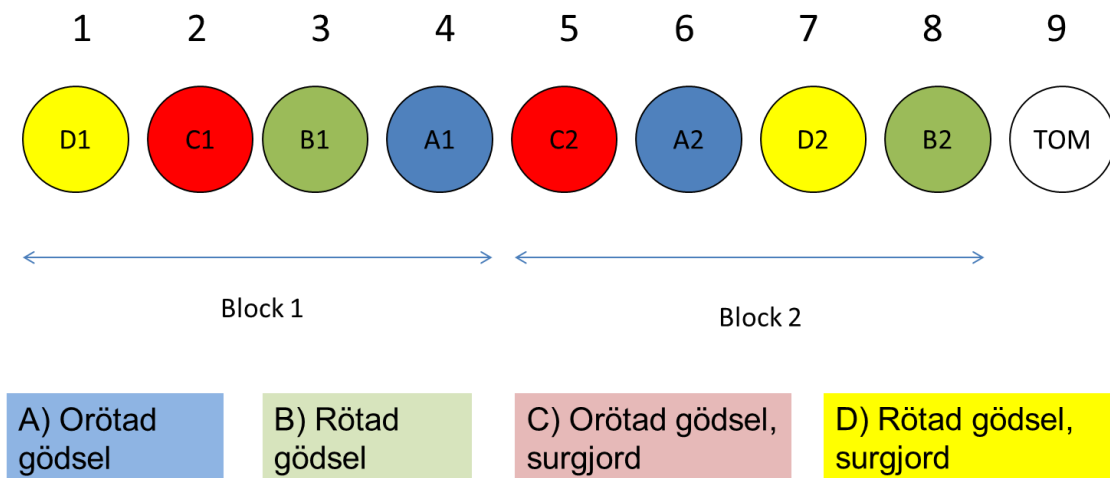
Nettovärmefflöde av långvågig strålning från vätskeytan har antagits till 60 W/m² (Solomon m.fl., 2007). Latent värme via avdunstning och smältning samt värmeledning till mark har ej beaktats.

2.3 Surgörning av gödsel (år 3)

Studierna år 3 utfördes från 3 maj t.o.m. 29 augusti 2017 ("sommarförhållanden", ca 4 månader) i JTI:s pilotskalanläggning för mätning av växthusgaser. Anläggningen finns beskriven i kapitel 3.1 samt i Rodhe m.fl. (2008). I pilotskalan mättes emissioner av växthusgaser under sommaren från försöksleden:

- A) Orötad gödsel,
- B) Rötad gödsel,
- C) Orötad gödsel, surgjord (pH <5,5) och
- D) Rötad gödsel, surgjord (pH <5,5).

I Figur 8 visas försöksuppställningen. Den experimentella designen var randomiserat blockförsök för att säkerställa den statistiska bearbetningen.



Figur 8. Försökupställning. Försöksleden A-D är organiserade som ett fullständigt randomiserat blockförsök, dvs. i varje block har försöksledens placering slumpats.

2.3.1 Gödsel

2.3.1.1 Titring och surgörning med koncentrerad svavelsyra

Innan fyllningen av pilotlagren utfördes titringar med orötad och rötad gödsel för att få en uppfattning om hur mycket svavelsyra som behövdes för att sänka pH till <math><5,5</math> för respektive gödseltyp. De prover som titrerades var hämtade den 12 april från samma gård som gödseln till pilotskalelagren. Färsk gödsel togs från ladugårdens uppsamlingsbrunn, och rötad gödsel togs från utloppet på röt-kammaren. Titringen utfördes i steg vid tillförel av 0,5 ml svavelsyra 1N motsvarande koncentrationen ca 5 %.

2.3.1.2 Fyllning av lager och registreringar

Gödsel hämtades med vakuumbil på morgonen den 3 maj från Olpers biogasanläggning i Hälsingland, där de rötade nötflytgödsel med ca 0,5 % tillsats av havrekross. I stallet användes sågspån som strö, ca 0,3 viktprocent av producerad mängd rötrest. På gården finns två röt-kammare, som körs parallellt vid ca 36-37°C och den hydrauliska uppehållstiden (HRT) i röt-kammaren var ca 37 dagar. Röt-kammarna matades växelvis, vardera fem gånger per dag, totalt ca 6 m³ per dag. Den producerade gasen användes för uppvärmning av hus. Se vidare beskrivning från Hushållningssällskapet (2014).

Ca kl. 15.45 anlände den fullastade slambilen till pilotlageranläggningen på Ultuna. Kl. 16 påbörjades fyllningen av lagren, först med rötrest, sedan med gödsel, uppdelat i 2-3 omgångar per behållare (4 behållare per gödseltyp) för att få liknande gödsel i alla behållare, för det motverka eventuella skiktningar i slambilen. Målet var att fylla till nivån ca 1,1 m och faktiska nivåer registrerades, vilket för samtliga åtta behållare blev strax över 1 m (2 m³). Fyllningen av alla lagringsbehållare var klar kl. 16.45.

Vid fyllningen togs samlingsprover för orötad respektive rötad gödsel för senare analys av torrsubstans (TS), organisk substans (VS), totalkväve (Tot-N), totalt ammoniumkväve (TAN), totalkol (Tot-C) och pH. Prov togs också ut för satsvisa utrötningar i en-litersflaskor vid 37 °C under ca 100 dagar beskriven av Rodhe m.fl. (2008). Därvid bestäms dels gödselns maximala metanbildningskapacitet (B_0) med tillsats av ymp, dels rötrestens restmetanpotential utan tillsats av ymp vid 37 °C. Prov togs också för analys på färskt prov av flyktiga fettsyror (VFA) och pH.

Vid ca 17.30 började vi surgöra rötad gödsel (behållare nr 1), genom att suga upp rötade gödseln i försöksspridarens tank, där syran tillfördes med hjälp av en syrapump av slangtyp CLIPTONPUMPENTM (<http://www.clipton.se/Pump-satser/pump-satser.html>) försett med ett 1,5 m långt stålrörsmunstycke. När syran tillfördes var gödseln under omrörning med spridarens pump. Det skummade då mycket kraftigt, så därför övergick vi till att tillsätta syran direkt i lagringsbehållarna under gödselytan samtidigt som gödseln rördes om med en separat propelleromrörare (figur 9). Det fungerade i stort sett bra att tillsätta syran direkt i behållaren med hjälp av syrapumpen, men på grund av skumbildningen så måste vi göra pauser under tillsatsen av syra och arbetet avslutades vid 23-tiden. Dagen därpå tillfördes ytterligare lite syra till den rötade gödseln i Block 2 (figur 8).



Figur 9. Omrörning av rötad gödsel (led D) efter tillsättning av syra. Nivån i behållaren steg betydligt p.g.a. skumbildning. Ansiktsmask användes p.g.a. gasbildning till följd av syratillsatsen.

Medeltemperaturen i pilotlagren registrerades för trettimmarsperioder uppmätta med temperaturgivare placerade 0,1 m från botten respektive 0,1 m under ytan (Intab Interface-Teknik AB, Stenkullen, Sweden). Meteorologiska data hämtades från Ultuna väderstation, ca 900 m från lagringsanläggningen.

Gasprovtagningarna upprepades 10 gånger med första mätning den 5 maj och sista mätningen 29 augusti 2017 (116 dygn). I samband med gasmätningar så dokumenterades gödselytorna genom fotografering samt gödselnivåer och eventuell svämtäckesbildning registrerades. Ca 1 dm under gödselytan mättes också pH med instrument från Hanna Instruments Edge blue Serie No. C0211905E med en elektrod i plast för mätning i fält (Elektrod pH-HALO Bluetooth(R) Plastic (Serie No. C4AD79) i samband med gasmätning. I laboratorium vid titreringar användes samma instrument men då med en glaselektrod Elektrod pH-HALO Bluetooth(R) (Serie No. A89950).

Den 24 augusti rördes gödseln om för att se om det behövdes kompletterande surgörning innan sista gasmätningen 29 augusti. Innan omrörningen noterades förekomst av eventuellt svämtäcke och bottensediment samt pH, mätt ca 5 cm under gödselytan. Efter omrörningen mättes pH igen ca fem cm under gödselytan för att se betydelsen av omrörningen.

Emissionerna av metan, koldioxid och lustgas mättes och beräknades på samma sätt som beskrivits i kapitel 2.1.3.

2.3.1.3 Avslutning av lagringsstudie

Den 13 september ca 2 veckor efter sista gasmätningen avslutades lagringen och behållarna tömdes på gödsel. Vid tillfället dokumenterades gödselnivåer och yta som täcktes av eventuellt svämtäcke, innan gödseln rördes om och gödselprover togs ut för analyser ur respektive behållare. Proverna analyserades med avseende på samma egenskaper som vid start av lagringen. Innan omrörningen lyftes temperaturloggrarna ut ur behållarna för att därefter tömmas på temperaturdata.

3 Resultat

3.1 Utrötningsgraden (år 1)

3.1.1 Biogasproduktionen vid anläggning

Metanproduktionen beräknades vara 17,4 Nm³/ton gödselblandning efter passage av båda röt-kamrarna, vilket ger ett metanutbyte på 190 Ndm³/kg tillförd VS. Metanproduktionen i R1 beräknades vara 13,9 Nm³/ton gödselblandning och metanproduktionen i R2 beräknades vara 3,5 Nm³/ton gödselblandning. Metanutbytet i R1 har beräknats till 151 Ndm³/kg tillförd VS via gödselblandningen, vilket ligger nära det värde som Castillo (2012) rapporterat på 148 Ndm³ CH₄/kg VS (rötning av flytgödsel från mjölkcor vid 37 °C, 23 dagars uppehållstid och en belastning på 3,4 kg VS/m³ och dygn). Metanutbytet i R2 har beräknats till 59 Ndm³/kg tillförd VS via den rötade gödselblandningen som lämnar R1.

Den totala biogasproduktionen motsvarar 3,9 % av vikten på tillförd gödselblandning, vilket innebär att utflödet från R2 utgör 96,1 % av gödselblandningens vikt. Gödselblandningens VS-reduktion beräknades till 43 % efter passage av R1 och R2. Massbalansberäkningen över R1 gav att vikten på utflödet från R1 utgör 96,9 % av vikten

på inflödet till R1. Baserat på dessa beräkningar kan metanproduktionen också uttryckas som:

- 14,3 m³ metan/ton utflöde från R1.
- 3,8 m³ metan/ton utflöde från R2.

3.1.2 Egenskaper hos gödsel och rötrest

Gödselns torrsubstanshalt (TS), glödförlust (VS) och innehåll av kväve, kol, fosfor och kalium samt flyktiga fettsyror (Volatile fatty acids, VFA) och pH visas vid start av lagring, tabell 3.

Tabell 3. Gödselns torrsubstanshalt (TS), glödförlust (VS) och innehåll av kväve, kol, fosfor och kalium samt flyktiga fettsyror (Volatile fatty acids, VFA) och pH vid start och slut av lagring i pilotskålebehållare.

Gödsel- slag	Tid- punkt	Kg per ton våtvara							Tot- C /Tot- N	Ndm ³ CH ₄ kg VS ⁻¹
		TS, %	VS, % av TS	VFA, g l ⁻¹	pH	Tot- N	TAN	Tot- C		
A) Orötad gödsel	Start	11,0	82,8	9,4	6,8	5,4	2,5	49,2	9,1	207*
	Slut	10,6	82,9	12,6	6,5	4,0	1,5	48,7	12,2	-
B) Rötad gödsel, R1	Start	8,1	76,9	<0,1	7,4	5,3	3,1	33,7	6,4	74**
	Slut	6,8	75,7	0,4	7,6	3,4	1,6	29,4	8,6	-
C) Rötad gödsel, R2	Start	7,3	74,3	<0,1	7,6	5,2	3,1	30,4	5,8	61**
	Slut	6,5	74,2	0,3	7,8	3,5	1,7	27,5	7,8	-

*Maximala metanbildningskapaciteten B₀ bestämd med tillsats av ymp vid 37°C.

**Restmetanpotentialen bestämd utan tillsats av ymp vid 37 °C.

Den maximala metanbildningskapaciteten (B₀) för gödseln uppgick till 207 Ndm³ CH₄/kg VS (19 m³ CH₄/ton gödsel), tabell 3. Metanutbytet vid anläggningen (190 Ndm³/kg tillförd VS) motsvarar alltså ca 92 % av B₀ från gödselblandningen, vilket är högt och kan delvis bero på att rötkammarna drevs vid 39-40 °C medan bestämningen av B₀ gjordes vid 37 °C. Vid enstegsrötning var metanproduktionen från rötkammare 1 ca 73 % av gödselblandningens B₀-värde.

Restmetanpotentialen för R1 uppgick till 4,6 m³ CH₄/ton rötrest, vilket motsvarar ca 32 % av metanproduktionen från första rötkammaren (14,3 m³/ton rötrest). För R2 var restmetanpotentialen 3,3 m³ CH₄/ton rötrest, vilket utgör 18 % av den totala metanproduktionen från båda rötkammarna (18,1 m³/ton rötrest).

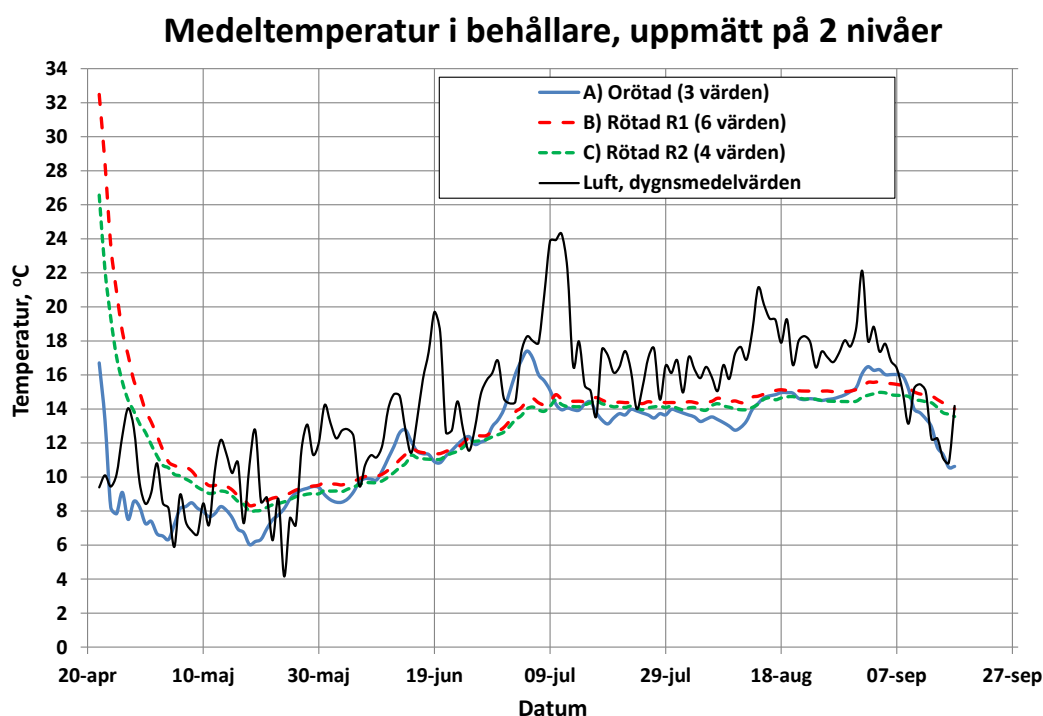
Svämtäcke på den orötade gödselblandningen, var ca 0,55 m tjockt och i behållarna med rötad gödsel i ett steg (R1), var svämtäcket ca 0,15 m tjockt. I behållarna med rötad gödsel i två steg (R2) saknades svämtäcke.

I tidigare studier av orötad gödsel under ett års lagring (Rodhe m.fl., 2008) var ts-halten i övre skiktet som högst 17,2 % på våren innan tömning. Den rötade gödselblandningen hade ts-halten i övre skiktet 0-10 cm 17,4 %, och 15,3 % i båda de undre skikten 10-20 respektive 20-30 cm. Ts-halten hos svämtäcket i R1 var lägre, under 13 %.

3.1.3 Emissioner från pilotskala

3.1.3.1 Lagringsförhållanden

Våren och försommaren 2015 var relativt kalla och först i början av juli kom värmen. I figur 10 visas hur dygnsmedelvärdet på temperatur i luft samt medeltemperaturen för de tre olika gödsel/rötreterna. Initialt var lagertemperaturen högre i R1 och R2 jämfört med den orötade gödselblandningen, men efter ca 14 dagar var temperaturerna desamma. Senare varierade den orötade gödseln något mer, antagligen för att övre temperaturgivaren låg i det tjocka svämtäcket och hade eventuellt mer kontakt med luften. I ett storskaligt lager med kontinuerlig tillförsel av gödsel/rötrest hade det inte varit så stor temperaturskillnad initialt mellan orötad och rötad gödselslag, men däremot hade temperaturen hos de rötade gödselslagen legat högre under de efterföljande månaderna till följd av kontinuerlig tillförsel av varm rötrest, ca 1-4 °C högre enligt Rodhe m.fl. (2013).



Figur 10. Medeltemperaturen hos A) Orötad gödselblandning, B) Rötad gödsel, R1 och C) Rötad gödsel, R2 under lagring, 140 dygn samt lufttemperaturen (medeltal per dygn).

I tabell 4 redovisas medeltemperaturer för respektive gödsel, uppmätt i tre behållare och på två nivåer. Högre temperatur i början av lagringen hos rötade gödseln och isolerande halmsvämtäcke hos orötad gödsel har påverkat så att i stort var medeltemperaturen lägst i den tvåstegsrötade gödseln, medan det inte var någon större skillnad mellan orötade gödselblandningen och den enstegsrötade gödseln. Temperaturen i behållarnas ytzon var från och med början av juni till mitten av augusti ca 2 grader högre än temperaturen i bottenzonen, därefter minskade differensen till ca 1 grads skillnad. Medeltemperaturen hos luften var 14,5 °C och nederbörden 196,5 mm under mätperioden från den 23/4 till den 10/9. Under hela lagringsperioden 22 april till 19 oktober 2015 var nederbörden 233,3 mm.

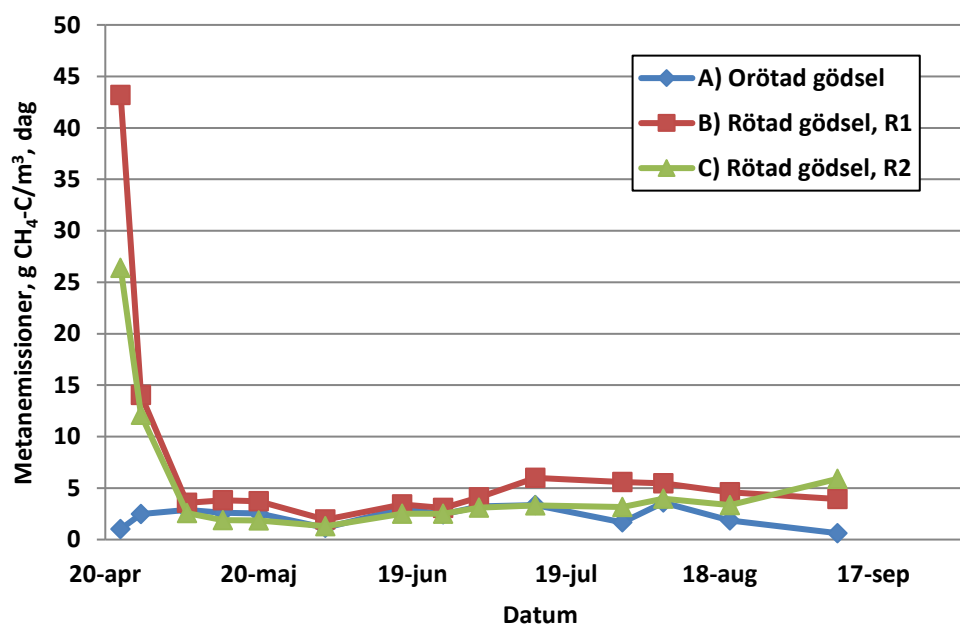
Tabell 4. Temperaturer i luft och gödsel vid lagring under 140 dagar i pilotskalebehållare.

	Luft, °C	Medeltemperatur i behållare, °C			Medeltemperatur övre nivå, °C			Medeltemperatur, nedre nivå, °C		
		A)*	B)	C)	A)*	B)	C)	A)	B)	C)
Medeltal	14,5	11,9	13,1	12,5	14,1	13,7	13,6	9,7	12,5	11,5
Max	30,8	17,6	32,5	26,6	19,7	33,2	28,0	19,2	31,8	25,0
Min	-1,8	4,5	8,3	7,9	3,7	8,1	8,1	5,3	8,4	8,0

*Övre temperaturnivån i poröst svämtäcke

3.1.3.2 Metan och koldioxid

I figur 11 visas metanemissionerna under studien. Högst emissioner var det i början av lagringen från den rötade gödseln. Det kan förklaras både med den initialt höga temperaturen och en högre metanbildande aktivitet. När temperaturen i gödselslagen låg under 10 °C (slutet av maj – början av juni) var emissionerna låga och det var ingen större skillnad mellan gödselslagen. I början av juli och senare i augusti ökade temperaturen igen i lagren och då ökade emissionerna från den rötade gödseln medan emissionerna från den orötade snarare avtog. Under de första 15 dagarna avgick 11, 32 och 32 % av totala metanemissionerna för A, B respektive C, så största delen avgick under resterande lagringstid.



Figur 11. Metanemissioner (g CH₄-C per m³ och dag) under lagring av A) Orötad gödsel, B) Rötad gödsel, R1 och C) Rötad gödsel, R2 under lagring, 140 dagar.

I tabell 5 visas kumulativa förlusterna av metan och koldioxid. Det var statistiskt säkra skillnader för metanemissionerna, där R1 gav högre emissioner än orötad gödsel och rötad R2. Vidare hade rötad R2 signifikant högre metanemissioner än orötad gödsel. Koldioxidförlusten var störst från gödselblandningen (A), vilket troligen berodde på den stora inblandningen av djupströgödsel, vilket skapar ett svämtäcke med betydande aerob mikrobiologisk aktivitet, som genererat koldioxid (CO₂), tabell 5.

Tabell 5. Metanemissioner i medeltal per m³ och dag, kumulativt per m³ och kg VS i ursprunglig gödsel, samt beräknad andel av ursprungligt innehåll av kol (C) för lagrad (A) orötad gödsel, (B) rötad gödsel ett steg R1 och (C) rötad gödsel i två steg R2 under lagring 140 dagar under april-september 2015. Även emissioner av koldioxid (CO₂).

Försöks- led	Metanemissioner				Koldioxid		Förlust av kol (C), % av Tot-C	
	g CH ₄ -C m ⁻³ d ⁻¹	g CH ₄ -C m ⁻³	g CH ₄ -C kg ⁻¹ VS	kg CO ₂ ekv. m ⁻³	g CO ₂ -C m ⁻³	g CO ₂ -C kg ⁻¹ VS	CH ₄ -C	CO ₂ -C
A) Orötad	2,33 ^c	328,7 ^c	3,62 ^c	11,0 ^c	2468,2 ^a	27,22 ^a	0,7	5,0
B) Rötad, R1	5,53 ^a	779,5 ^a	12,51 ^a	25,8 ^a	946,2 ^b	15,28 ^b	2,3	2,8
C) Rötad, R2	3,92 ^b	553,3 ^b	10,16 ^b	18,4 ^b	721,0 ^b	13,24 ^b	1,8	2,4
Samman- vägda medelfel	0,17	24,0	0,31	0,84	122,6	1,49		

^{a, b, c} Medelvärden med olika bokstäver inom respektive kolumn har en signifikant skillnad p<0,05

3.1.3.3 Metangas från lager i förhållande till biogasproduktion, sommar

I tabell 6 redovisas metanemissionerna från lager i relation till beräknad metanproduktion från gårdsanläggningen vid en- respektive tvåstegsrötning. Det kan vara en typ av nyckeltal för att visa klimateffektiviteten hos anläggningen. Anläggningens klimatpåverkan per producerad biogasmängd blir betydligt lägre vid tvåstegsrötning jämfört med enstegsrötning.

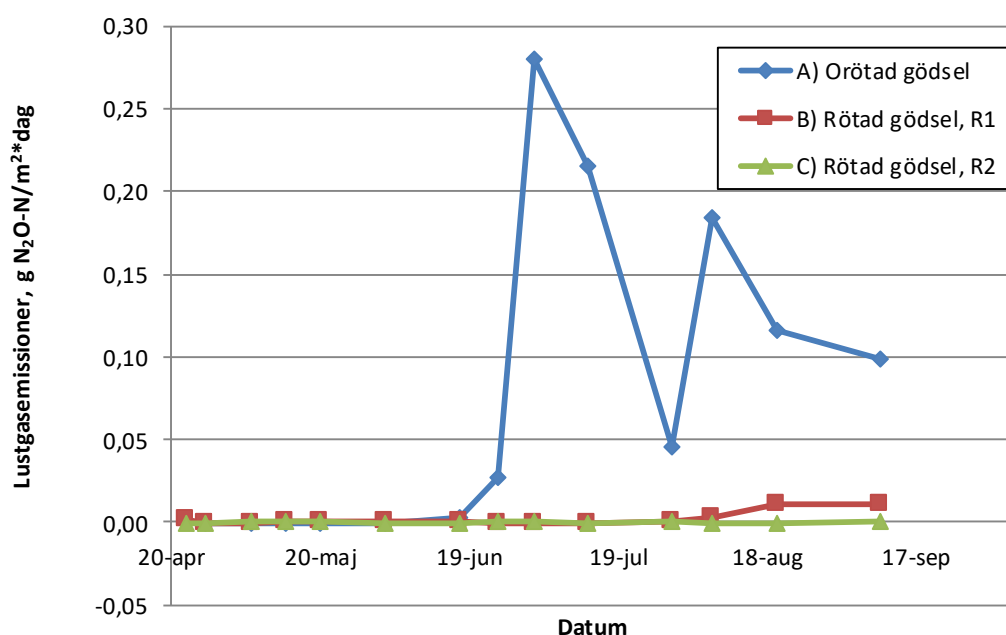
Tabell 6. Metanemission från pilotlager med rötrest (R1 respektive R2) relativt beräknad metanproduktion från gårdsanläggning vid en- respektive tvåstegsrötning.

Rötnings- process gård	Metan- gasproduktion biogaskammare, Nm ³ /ton	Metanemissioner lager rötrest, g CH ₄ -C m ⁻³	Metan- emissioner lager rötrest, Nm ³ /ton*	Metan från lager, % av producerat metan från rötkammare
Enstegsrötning	14,3	779,5	1,46	10,2
Tvästegsrötning	18,1	553,3	1,03	5,7

*Omräknat från resultat i tabell 4

3.1.3.4 Lustgas

Efter ca 65 dagar började det avgå lustgas från den orötade gödseln, som hade ett tjockt svämtäcke, figur 12. Det förekom lustgasemissioner ända fram till sista mätningen. Under senare delen av lagringen var det också små lustgasemissioner från rötade gödseln R1, som också hade ett svämtäcke, men betydligt tunnare än den orötade gödseln.



Figur 12. Lustgasemissioner (g N₂O-N per m² och dag) från lager med A) Orötad gödsel, B) Rötad gödsel, R1 och C) Rötad gödsel, R2, under 140 dagars lagring.

I tabell 7 visas kumulativa lustgasemissionerna. Den orötade gödseln med tjockt svämtäcke gav signifikant högre lustgasemissioner än de två rötresterna.

Tabell 7. Kumulativa lustgasemissioner (g N₂O-N/m² respektive g N₂O-N/m³) och emissionsfaktorer (EF_{N₂O}) i procent av N i lager vid start lagring, samt sammanlagda klimatpåverkan (GWP₁₀₀) från metan och lustgas i kg CO₂ekv./m³.

Försöksled	Lustgasemissioner				N ₂ O och CH ₄
	g N ₂ O-N m ⁻²	g N ₂ O- N m ⁻³	Kg CO ₂ ekv. m ⁻³	EF _{N₂O} , %	Kg CO ₂ ekv. m ⁻³
A) Orötad gödsel	11,2 ^a	10,2 ^a	4,8 ^a	0,19	15,7 ^b
B) Rötad gödsel, R1	0,3 ^b	0,3 ^b	0,1 ^b	0,01	26,0 ^a
C) Rötad gödsel, R2	0,0 ^b	0,0 ^b	0,0 ^b	0,00	18,4 ^b
Sammanvägda medelfel	0,46	0,35	0,16		0,89

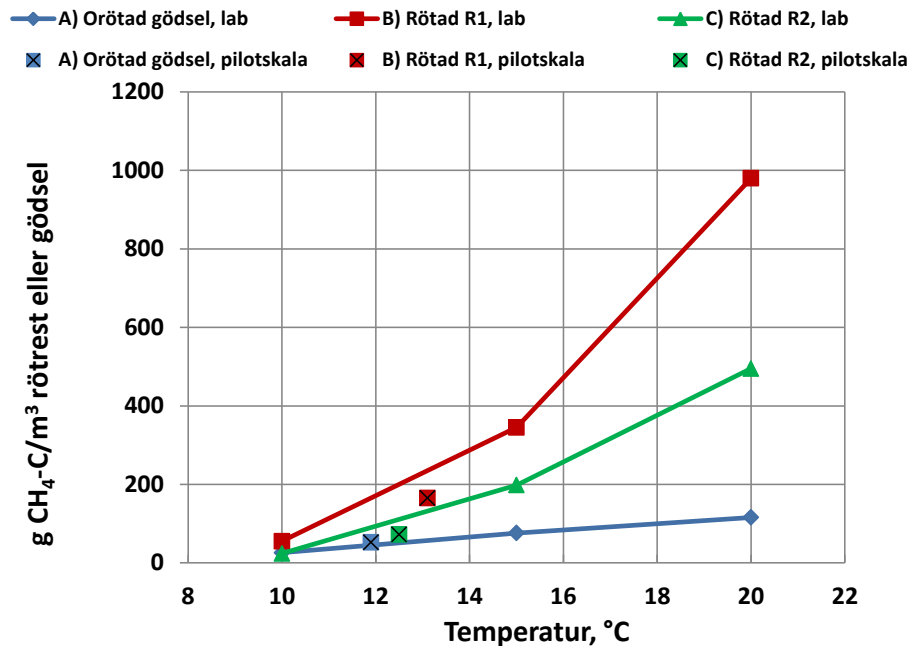
^{a, b} Medelvärden med olika bokstäver inom respektive kolumn har en signifikant skillnad ($p < 0,05$)

3.1.3.5 Påverkan på den globala uppvärmningen (GWP₁₀₀)

Den sammanvägda påverkan av CH₄ och N₂O på globala klimatuppvärmningen (GWP₁₀₀) var signifikant högre för B) rötad gödsel, R1 än för A) orötad gödselblandning respektive C) rötad gödsel, R2, tabell 7. Det gick dock inte att påvisa signifikanta skillnader mellan den orötade gödselblandningen och tvåstegsrötad gödsel.

3.1.4 Metanproduktion i laboratorieförsök, inverkan av temperatur

Temperaturens betydelse för metanproduktionen från de tre materialen (gödsel, R1 och R2) framgår tydligt av figur 13, som visar den kumulativa produktionen efter 140 dagar vid olika temperaturer.



Figur 13. Kumulativa metangasproduktionen från orötad gödsel, rötad gödsel i ett steg (R1) och i två steg (R2) vid inkubering i flaskor i laboratorium vid temperaturerna 10, 15 och 20 °C, samt i pilotskalebehållarna med rådande temperatur.

R1 påverkades mest av temperaturen följt av R2 och gödsel. Detta beror sannolikt på att rötresten innehåller en större andel metanbildande mikroorganismer som aktiveras vid stigande temperatur. Vid 10 °C är skillnaderna försumbara, vilket indikerar att lagringstemperaturer ned mot 10 °C ger mycket låga emissioner oavsett om det är orötad eller rötad gödsel. I figuren finns även den kumulativa metanproduktionen för de flaskor som inkuberats i pilotlagren, där medeltemperaturen var ca 12-13 °C (tabell 4). Kumulativa emissionerna uppsamlade från flaskorna var för orötad gödsel 52, för R1 165 och för R2 72 g CH₄-C/m³. Motsvarande värden uppmätta i pilotskalan, var 5 till 8 gånger högre (tabell 5). I pilotskalan är gödseln utsatt för omgivande klimat med nederbörd, solinstrålning och vind medan gödseln i flaskorna har samma luft ovanför gödselytan. Det är därmed olika volymförhållanden mellan gödsel och luft, och gödseln i flaskorna förändras inte på samma sätt som i pilotskalan under lagringen. Det är därför olika system som inte gav samma absolutvärden när det gäller de kumulativa metanemissionerna. Lustgasemissionerna mättes inte från flaskorna eftersom det förutsätter syretillgång, vilket det slutna flasksystemet inte medger.

Sammanfattning av resultaten år 1

Pilotförsöket visade att:

- Rötning i två steg under 48 dagar jämfört med ett steg under 24 dagar minskade metanemissionerna från lager med ca 30 procent under sommarhalvåret (ca 5 månader).
- Metanemissionerna från rötad gödsel i ett steg var ca 2,5 ggr högre än från ej rötad gödselblandning och vid två-stegsrötning gav den rötade gödseln ca 1,7 ggr högre emissioner under sommarlagring.
- Lustgas avgick efter ca 65 dagars lagring från den orötade gödselblandningen, där det bildats ett tjockt svämtäcke under sommarförhållanden.
- Den sammanvägda påverkan av CH₄ och N₂O på globala klimat-uppvärmningen (GWP₁₀₀) vid sommarlagring var lägst för orötad gödselblandning (15,7 kg CO₂e per m³ gödsel in i lagret), högst för rötad gödsel i ett steg, (26,0) och rötad gödsel i två steg, R2 låg däremellan (18,4).

Laboratorieförsöket visade att:

- Även i denna skala utfört vid samma temperaturer erhöles högst metanemissioner från rötad gödsel i ett steg, följt av rötad gödsel i två steg och lägst från orötad gödsel.
- Metanproduktionen vid lagring av rötrest från både R1 och R2 var starkt beroende av lagringstemperaturen. Vid temperaturen 15 °C var metanproduktionen ca 5 ggr och vid 20 °C ca 20 ggr högre än metanproduktionen vid 10 °C.
- Metanproduktionen vid lagring av orötad gödselblandning var mindre beroende av lagringstemperaturen än den rötade gödseln. Vid 15 °C temperatur var metanproduktionen ca 2 ggr och vid 20 °C ca 5 ggr högre än metanproduktionen vid 10 °C.

3.2 Täckning av lager (år 2)

3.2.1 Egenskaper hos gödsel och rötrest

Gödselns torrsubstanshalt (TS), glödförlust (VS) pH och innehåll av kväve, fosfor, kalium och kol visas vid olika tillfällen och för olika studier, tabell 8.

Tabell 8. Gödselns torrsubstanshalt (TS), glödförlust (VS), pH och innehåll av kväve (N), kol (C), fosfor (P) och kalium (K) vid olika tidpunkter. Flytgödselprov på försöksgård 1 togs ca 0,5 m under gödselytan (ej omrörd gödsel), förutom sista provet 6 oktober, som togs ut från omrörd behållare. Standardavvikelse inom parentes.

Datum 2016, (mätning nr)	TS, %	VS, % av TS	pH*	Kg per ton våtvara					
				Tot-N	TAN	Tot-P	Tot-K	Tot-C	Tot-C/ Tot-N
<i>Studie 1, laboratorieförsök (nötfastgödsel)</i>									
05-12	19,3	80,8	8,9	4,8	0,9	1,39	5,36	73,1	15,2
<i>Studie 2, försöksgård 1 (nötflytgödsel)</i>									
05-12 (1)	4,5	79,2	7,3	2,3	1,3	0,31	2,23	17,9	7,7
06-03 (3)	1,8	64,5	7,4	1,7	1,1	0,16	1,98	6,7	4,0
Mätning 4-9** (n=6)	3,0 (0,8)	73,3 (5,2)	7,3 (0,1)	1,6 (0,2)	1,0 (0,1)	0,2 (0,0)	2,0 (0,1)	12,1 (3,3)	7,3 (1,4)
06-10**	5,4	75,2	7,4	2,4	1,1	0,43	2,75	22,4	9,5
<i>Studie 3, lagring under tak (rötad gödsel från nötkreatur och svin, foder)***</i>									
	5,2			3,7	2,2	0,5	3,4		
2016 (n=4)	(1,5)			(0,7)	(0,4)	(0,2)	(0,9)		

*pH uppmätt på fryst prov (Agrilab), Standardavvikelsen inom parentes

**Omrörd behållare

*** Ingående rötrest, data från kvartal 1 till 4, analys Agrilab AB

3.2.2 Studie 1: Test av olika behandling av svämtäcke

De orienterande studierna av olika behandlingar av fastgödselns yta visade att surgörning hämmade lustgasemissionerna och i viss mån även metanemissionerna, se tabell 9. Däremot verkade inte uppfuktning av ytskiktet (led 3) minska lustgasemissionerna.

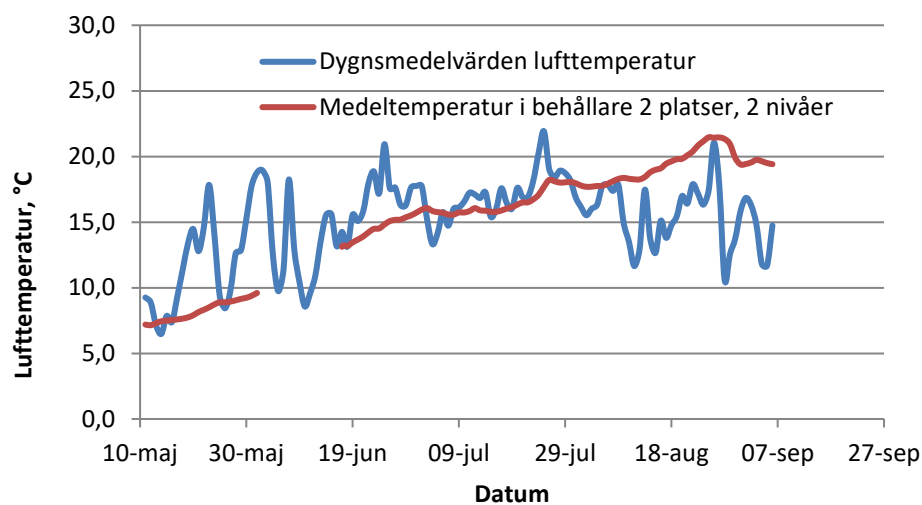
Tabell 9. Studie 1, orienterande försök i backar för att se effekt av olika behandling av fastgödsel för val av behandling i fullskaleförsök, försöksgård 1). Mängder, tillsatser, pH och emissioner. Se beskrivning av led i figur 4.

Led	Mängd vid start, kg	Före tillsats		Efter tillsats		Emissioner, g/m ² och dygn	
		2016-05-26 pH	2016-05-26 pH	2016-06-01 pH	2016-06-01 pH	N ₂ O-N	CH ₄ -C
1	38,7	8,6	-	8,2	0,1865	1,471	
2	37,6	8,62	8,55	8,12	0,1559	0,939	
3	34,8	8,62	8,19	7,99	0,2273	0,923	
4	33,4	8,65	<1,0	<1,0	0,0000	0,526	
5	34,5	8,68	<1,0	<1,0	0,0236	0,760	

3.2.3 Studie 2: Påverkan på svämtäcke, minimera lustgasemissioner (försöksgård 1)

3.2.3.1 Lagringsförhållanden

I figur 14 visas hur dygnsmedelvärdet på lufttemperatur samt medelvärdet för gödseltemperaturen på två olika platser och på två nivåer i behållaren under tiden för gasmätning, försöksgård 1.



Figur 14. Försöksgård 1. Medeltemperaturen luft (per dygn) och hos gödsel (medeltal per tre timmar) under mätsäsongen. I juni avbröts temperaturmätningarna i gödseln under tiden då gödseln spreds till vall.

I tabell 10 redovisas dygnsmedeltemperaturer för luft och för gödsel, uppmätt på två platser och på två nivåer. Temperaturen i behållarnas ytzon var i medeltal ca 4 grader högre än temperaturen i bottenzonen.

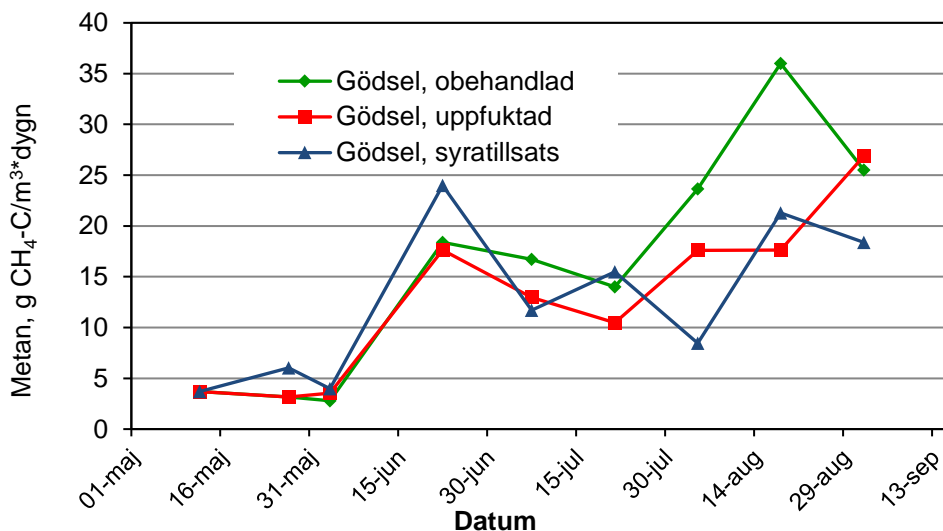
Tabell 10. Temperaturer i luft och gödsel vid lagring under 111 dygn i gödselbehållare.

	Luft	Medeltemperatur i behållare, °C	Medeltemperatur övre nivå, °C	Medeltemperatur, nedre nivå, °C
Medeltal	15	15,3	17,5	13,1
Max	29,5	21,9	27,6	16,3
Min	-0,1	6,9	7,9	6,0

Halmsvämtäcket som bildades hade en slät yta. Enligt analysen av hackselängden med JTI:s ”strållängdsmätare” var halvviktslängden 23 mm, övre kvartil 38 mm, undre kvartil 14 mm. Tjockleken hos svämtäcket varierade mellan ca 20-60 cm.

3.2.3.2 Metan och koldioxid

I figur 15 visas metanemissionerna under studien. Behandlingen av svämtäcket inleddes först vid andra mättillfället.



Figur 15. Metanemissioner (g CH₄-C per m³ och dygn) under lagring av gödsel, obehandlad, gödsel med uppfuktat svämtäcke och gödsel med syratillsats till svämtäcke under lagring, 111 dygn. Omrörning och tömning utfördes efter tredje mätningen.

Det var inga signifikanta skillnader i metanemissioner mellan leden (tabell 11). Det fanns ett samspel mellan block och led, vilket betyder att storleksordningen i emissioner för respektive gas för leden inte var i samma rangordning i alla block. Syratillsatsen gav signifikant högre koldioxidemissioner, vilket var förväntat då syran sänker pH och driver av koldioxid från bikarbonatbuffertsystemet. Vid beräkning av antropogena klimatpåverkan (GWP₁₀₀) ingår inte koldioxid från växtmaterial eller stallgödsel då det tidigare bundits av växterna (är i kretslopp), tabell 11.

Tabell 11. Metan- och lustgasemissioner i medeltal per m³ och dygn, kumulativt per m³, för A) Gödsel, obehandlad B) Gödsel, uppfuktat svämtäcke och C) Gödsel, syratillsats till svämtäcke under lagring, 111 dygn, 12 maj till 1 september. Även emissioner koldioxid presenteras, samt GWP₁₀₀ för metan och lustgas.

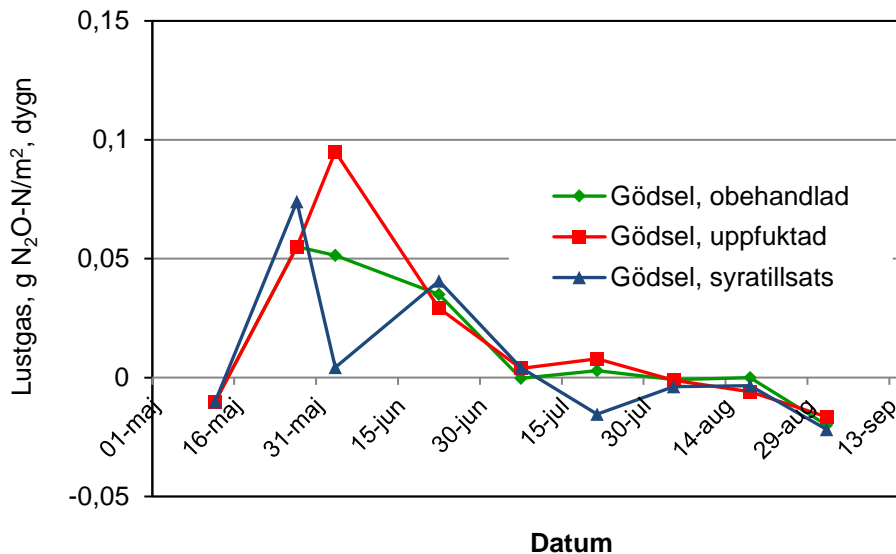
Led	Metan-emissioner		Kol-dioxid g CO ₂ -C m ⁻³	Lustgas			GWP ₁₀₀ , kg CO ₂ ekv. m ⁻³		
	g CH ₄ -C m ⁻³ d ⁻¹	kg CH ₄ -C m ⁻³		g N ₂ O-N m ⁻² d ⁻¹	g N ₂ O-N m ⁻²	g N ₂ O-N m ⁻³	CH ₄	N ₂ O	Summa CH ₄ och N ₂ O
A	16,72	1,86	397,4 ^a	0,019	2,07	1,28	61,9	0,000	61,9
B	12,74	1,41	-1,0 ^a	0,025	2,76	1,49	47,1	0,000	47,1
C	13,24	1,47	1322 ^b	0,012	1,31	1,00	49,0	0,000	49,0
SM*	ns	0,39 ns	302,5 *	ns	1,20 ns	ns	12,3 ns	ns	ns

^{a, b, c} Medelvärden med olika bokstäver inom respektive kolumn har en signifikant skillnad p<0,05
ns, ej signifikanta skillnader

*Sammanvägda medelfel

3.2.3.3 Lustgas

I stort var det låga lustgasemissioner, se figur 16 och tabell 11. Störst var de under andra mätningen (regnväder) och tredje mätning, men de avtog sedan och från mitten av juli var de knappt mätbara. Vid mätning tre hade den surgjordta ytan mycket lägre lustgasemissioner än övriga led. Led C med syratillsats i svämtäcket indikerar lägst lustgasemission, men det gick inte att visa några signifikanta skillnader mellan kumulativa lustgasemissionerna för de olika behandlingarna, tabell 11.



Figur 16. Lustgasemissioner (g N₂O-N per m² och dygn) under lagring av gödsel, obehandlad, gödsel, med uppfuktat svämtäcke och gödsel med syratillsats till svämtäcke under lagring, 111 dygn. Omrörning och tömning utfördes efter tredje mätningen.

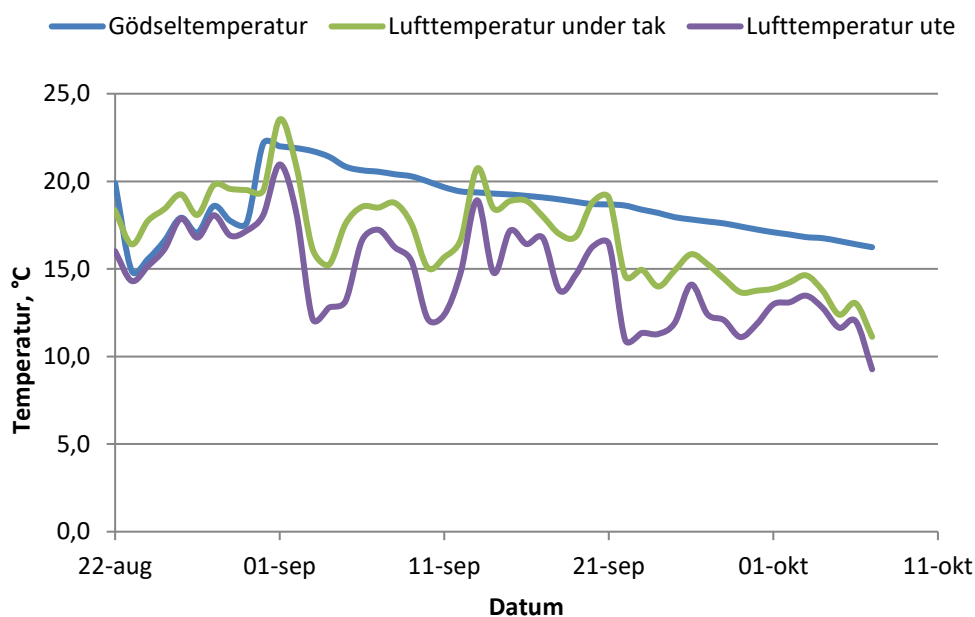
Stora gödselytor, t.ex. fullskalelagret ökar exponeringen för sol och höga vindhastigheter vilket kan ge både bra uttorkning av svämtäcket och bra luftpenetration i svämtäcket, vilket kan stimulera lustgasbildningen. I detta fall med finhackad halm som strö blev svämtäckets yta mycket slät. Detta verkade ha förhindrat luftpenetration och därmed mineralisering av ammoniumkvävet till nitrit och nitrat, vilket förutsätts vid lustgasbildning. Detta kan i sig vara en åtgärd för att minimera lustgasförlusterna, som vid poröst svämtäcke kan ha minst lika stor påverkan på globala uppvärmningen som metanemissioner från flytgödsellager (Rodhe m.fl., 2012).

3.2.4 Studie 3: Påverkan av tak på mikroklimatet (försöksgård 2)

Temperaturmätningarna under en stabil mätperiod i augusti till oktober visade i medeltal 2,4 °C högre temperatur i luften under tak jämfört med omgivande luft, tabell 12. Förutom att taket kan ha skapat ett skyddat mikroklimat, så kan den varmare rötresten värmt upp luften, se figur 17. Temperaturen under tak följde väl lufttemperaturen, medan gödseltemperaturen var mer stabil.

Tabell 12. Temperaturer i luft och rötad gödsel vid lagring under 47 dagar i gödselbehållare.

	Luft, °C	Luft under tak, °C	Medeltemperatur i behållare, °C	Medeltemperatur, övre nivå, °C	Medeltemperatur, nedre nivå, °C
Medeltal	13,3	15,7	18,6	18,6	18,5
Max	27	32	24,1	24,4	23,8
Min	-0,3	3,7	11,1	11,9	10,3



Figur 17. Dygnsmedelvärden för uteluft, luft under tak och temperatur hos rötad gödsel.

3.2.5 Studie 4. Värmebalans för lager med rötad gödsel, vår

Under mitten av april har nettotillförseln av värme till gödsellagret beräknats vara ca 2910 kWh/dag, tabell 13. Under de använda kalkylförutsättningarna tar det ca 36 timmar att öka temperaturen i den lagrade rötade gödsel med 1 °C, vilket innebär att temperaturen i lagret kan öka från 3 °C till 10 °C på ca 11 dygn.

Det kan konstateras att värmeförsel via strålning är helt avgörande i denna beräkning. Vintertid reflekteras merparten av solinstrålningen då dels solens vinkel mot mark är låg, dels att gödsellagrets yta kan vara snötäckt, vilket tillsammans bidrar till att öka albedovärdet. Resultatet från kalkylen i tabell 13 visar på att värmeförseln till lagret via solinstrålningen under våren är 2,9 ggr högre än summan av övriga bidrag till

värmetillförseln. Täckning av lagret med vit duk bör sannolikt höja albedovärdet. Om ett albedovärde på 0,7 antas kommer värmetillförseln via solen att reduceras till ca 1200 kWh/d. Med denna kalkylförutsättning tar det närmare 34 dagar för att höja temperaturen från 3 °C till 10 °C i lagrad rötrest.

Tabell 13. Beräknad värmetillförsel och värmeavgång i mitten av april för ett lager med 18 meters radie och 4000 ton rötad gödsel.

	Värmefflöde kWh/dag	Andel, %
<i><u>Värmetillförsel</u></i>		
Solinstrålning	3230	74
Konvektion vid ytan	530	12
Värme från tillförd rötad gödsel	600	14
<i>Summa värmetillförsel</i>	<i>4360</i>	<i>100</i>
<i><u>Värmeavgång</u></i>		
Nettovärmefflöde av långvågig strålning från vätskeytan	1450	
<i>Nettotillförsel av värme till rötad gödsel i lager</i>	<i>2910</i>	

3.2.6 Sammanfattning av resultaten år 2

Finhackat halmströ bildade ett slätt och tätt svämtäcke på nötflytgödsel i fullskalelager. Detta svämtäcke genererade ingen lustgas under perioden april till september, vilket innebar att de studerade åtgärderna för att minska lustgasemissionerna inte hade någon effekt. Det hade nämligen visat sig i en inledande småskalig studie att surgörning av ytan på fastgödsel hämmade lustgasbildningen. I stort fanns det inga signifikanta skillnader i metan- och lustgasemissioner mellan obehandlat, uppfuktat respektive surgjort svämtäcke i fullskalemätningarna. Det noterades att surgörning av svämtäcke stimulerade koldioxidavgång direkt efter tillförseln av syra p.g.a. sänkning av pH-värdet. Detta gav signifikant högre koldioxidemissioner vid syratillsats jämfört med övriga behandlingar.

Täckning av flytgödselbehållare med plasttak gav i medeltal 2,4 °C högre lufttemperatur under taket på rötrestlager jämfört med omgivande lufttemperatur under sensommar och tidig höst. Förutsättningarna fanns tyvärr inte för att kunna jämföra gödseltemperaturer med och utan tak. Takets skuggande effekt kan dock minska värmeinstrålningen. Beräkningar visar på att värmeinstrålningen till gödsellager kan förklara största delen av gödselns uppvärmning på våren. Genom beskuggning eller täckning av lager med vitt tak kan denna uppvärmning reduceras kraftigt.

3.3 Surgörning av gödsel (år 3)

3.3.1 Egenskaper hos gödsel och rötrest

I tabell 14 visas gödselns egenskaper i start och slut av lagringen. I starten analyserades ett samlingsprov av gödseln innan tillsats av syra, medan vid slutet av lagringen analyserades ett prov per behållare.

Tabell 14. Gödselns torrsbstanshalt (TS), glödförlust (VS) och innehåll av kväve, kol, fosfor och kalium samt flyktiga fettsyror (Volatile fatty acids, VFA) och pH vid start och slut av lagring i pilotskalebehållare. pH analyserades på färskt prov, övrigt analyserat på fryst prov.

Göd sel- slag	Tid- punkt	Kg per ton våtvara							Tot- C	VFA, g l ⁻¹	pH ^a	Tot-C /Tot- N	Ndm ³ CH ₄ kg VS ⁻¹
		TS, %	VS, % av TS	Tot-N	NH ₄ - N	P	K	S					
A)	Start	8,8	85,2	3,3	1,1	0,47	4,1	0,26	41,9	5,09	6,6	12,9	254,3*
	Slut							0,3					
		8,4 (0,1)	84,8 (0,5)	3,0 (0,03)	1,3 (0,04)	0,5 (0,02)	4,1 (0,1)	(0,0 1)	40,1 (0,35)	9,26 (0,19)	6,35 (0,07)	13,2 (0,03)	-
B)	Start	5,6	79,5	3,1	1,5	0,44	3,61	0,23	26,0	0,25	8,1	8,4	64,5**
	Slut	5,6 (0,0)	78,8	2,7 (0,06)	1,3 (0,00)	0,4 (0,01)	3,7 (0,0)	0,2 (0,0)	25,5 (0,14)	0,07 (0,02)	7,67 (0,02)	9,5	-
C)	Start ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	-	-
	Slut	8,7 (0,5)	84,3 (0,4)	3,4 (0,14)	1,2 (0,03)	0,4 (0,00)	4,0 (0,2)	1,2 (0,2)	39,7 (1,75)	5,72 (1,54)	5,37 (0,37)	11,5 (0,03)	-
D)	Start ^c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	-	-
	Slut	6,5 (0,1)	77,2 (0,03)	4,5 (0,11)	1,6 (0,03)	0,4 (0,00)	3,4 (0,1)	3,5 (0,3)	25,8 (0,13)	0,52 (0,22)	5,45 (0,49)	5,7 (0,10)	-

^aAnalys av färskt prov (pH)

^bAnalysvärdena motsvarar de för led A, förutom ökat innehåll av svavel (S) pga. syratillsatsen

^cAnalysvärdena motsvarar de för led B, förutom ökat innehåll av svavel (S) pga. syratillsatsen

*Maximala metanbildningskapaciteten B₀ bestämd med tillsats av ymp vid 37°C under 100 dagar

**Restmetanpotentialen bestämd utan tillsats av ymp vid 37 °C under 97 dagar.

Den 24 augusti, fem dagar innan sista gasmätningen, rördes gödseln om för att se om det behövdes kompletterande surgörning. Innan omrörningen noterades förekomst av eventuellt svämtäcke och bottensediment. I stort hade det inte bildats svämtäcken på ytorna i lagren utan det var öppna vätskeytor, utan något organiskt material på ytan. Undantagen var behållarna med rötad gödsel, där båda behållarna utan syra och en av behållarna med syratillsats hade tunt svämtäcke, se tabell 15. I alla behållare med orötad gödsel, både utan och med syra hade det däremot bildats djupa bottensediment, ca en halv meter djupa, tabell 15. Nötgödseln innehöll sågspån, samt en liten tillsats av havrekross (0,5 %). Spån har en tendens till att bilda bottensats i lager. Annars så brukar nötflytgödsel karaktäriseras av att det bildas svämtäcke, medan svinflytgödsel bildar bottensediment (Thyselius, 1974).

Tabell 15. Gödselnivå, svämtäcke och förekomst av bottensediment samt dess tjocklek/djup (per behållare) den 24 augusti, före omrörning.

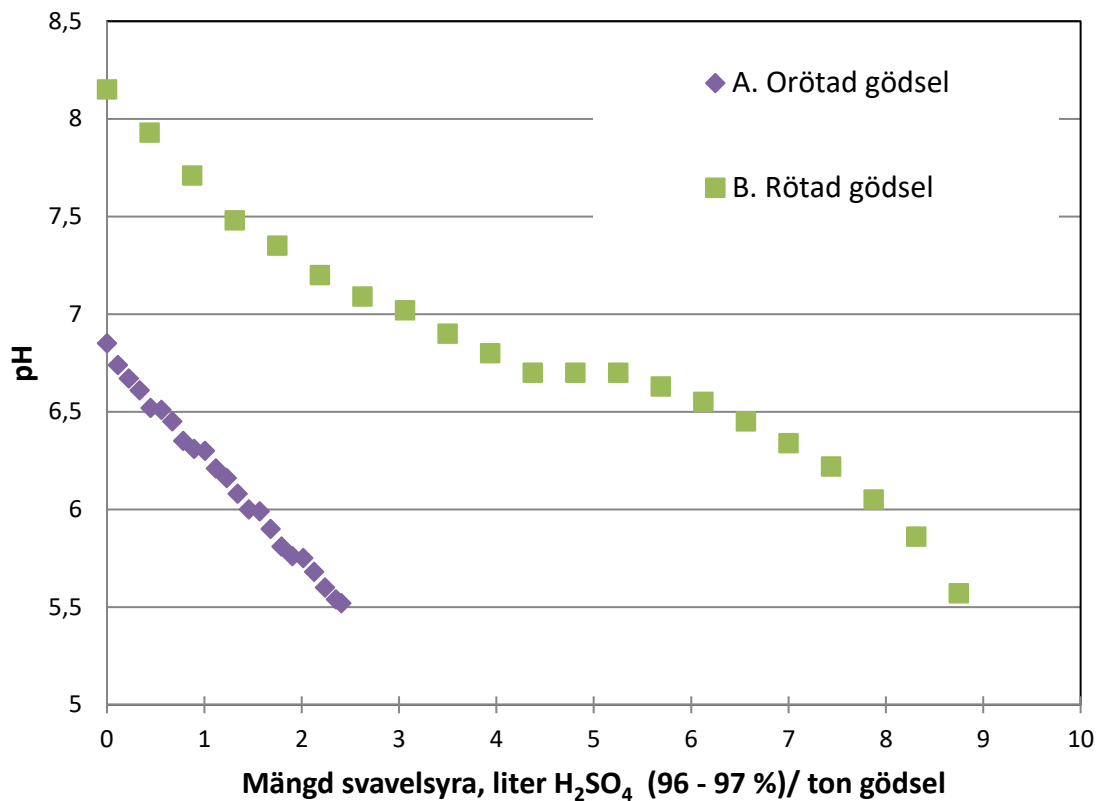
Behållare	Nivå gödsel, cm	Förekomst svämtäcke, tjocklek, cm	Förekomst bottensediment, djup, cm
A1	0,98	Nej	Ja, 59
A2	1,01	Nej	Ja, 48
B1	0,97	Ja, fläckvis; 1 cm	Nej
B2	1,02	Ja, 1 cm	Nej
C1	1,02	Nej	Ja, 61
C2	0,95	Nej	Ja, 55
D1	0,99	Nej	Nej
D2	1,02	Ja, på halva ytan; ca 1 cm	Nej

3.3.1.1 Avslutning av lagringsstudie

Den 13 september ca 2 veckor efter sista gasmätningen avslutades lagringen och behållarna tömdes på gödsel. Vid tillfället dokumenterades gödselnivåer och yta som täcktes av eventuellt svämtäcke, innan gödseln rördes om och gödselprover togs ut för analyser ur respektive behållare. Proverna analyserades med avseende på samma egenskaper som vid start av lagringen, se tabell 14. Innan omrörningen lyftes temperatur-loggrarna ut ur behållarna för att därefter tömmas på temperaturdata.

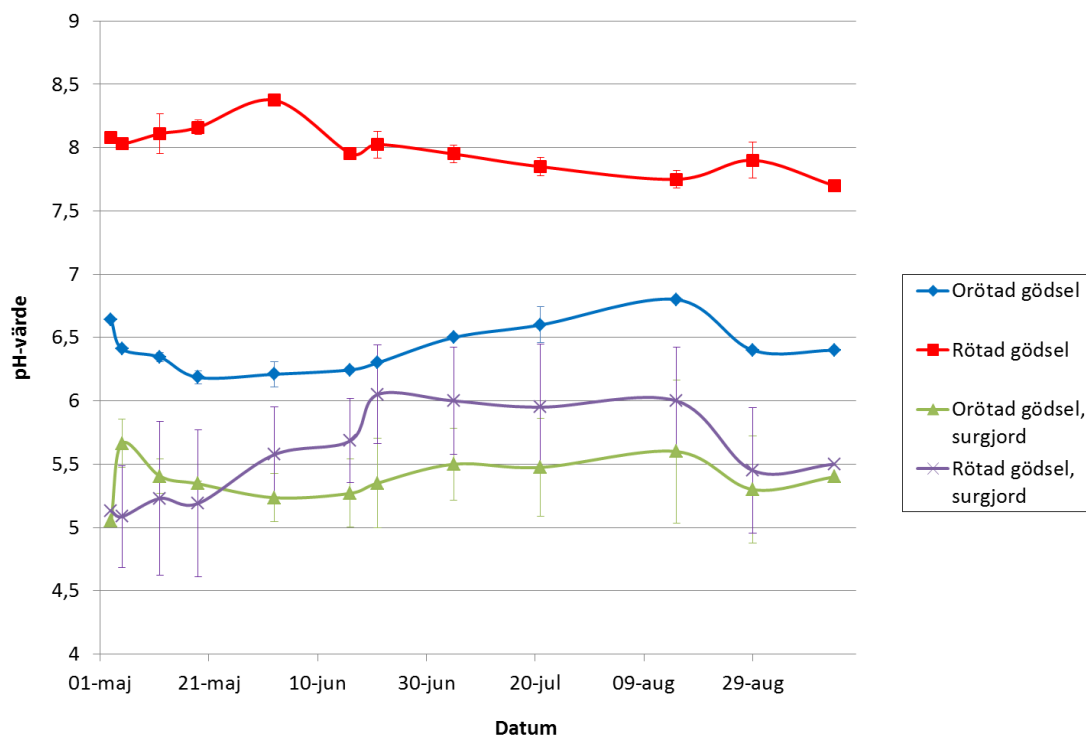
3.3.2 Surgörning och syraåtgång

I figur 18 visas titreringskurvorna för orötad respektive rötad gödsel vid sänkning av pH till 5,5 genom tillförsel av svavelsyra. De prover som titrerades var hämtade den 12 april från samma gård som gödseln hämtades ifrån till pilotskaleförsöken. Det initiala pH-värdet var betydligt högre för den rötade gödseln (pH 8,1) än för den orötade gödseln (pH 6,8). Vid syratillsats sjönk pH rätlinjigt för orötad gödsel, medan den rötade gödseln uppvisade en högre buffringsförmåga framför allt vid pH 6,7. Mängder syra för att nå pH 5,5 var mer än 3 ggr högre för den rötade gödseln (9 liter per m³) jämfört med den orötade gödsel (2,5 liter per m³), figur 18. Den rötade gödselns höga buffertkapacitet beror rimligen på en hög bikarbonatkoncentration. Vidarekan det förklaras av den rötade gödselns högre pH-värde, lägre innehåll av flyktiga fettsyror (VFA) och högre ammoniumkoncentration jämfört med den orötade gödseln (tabell 14).



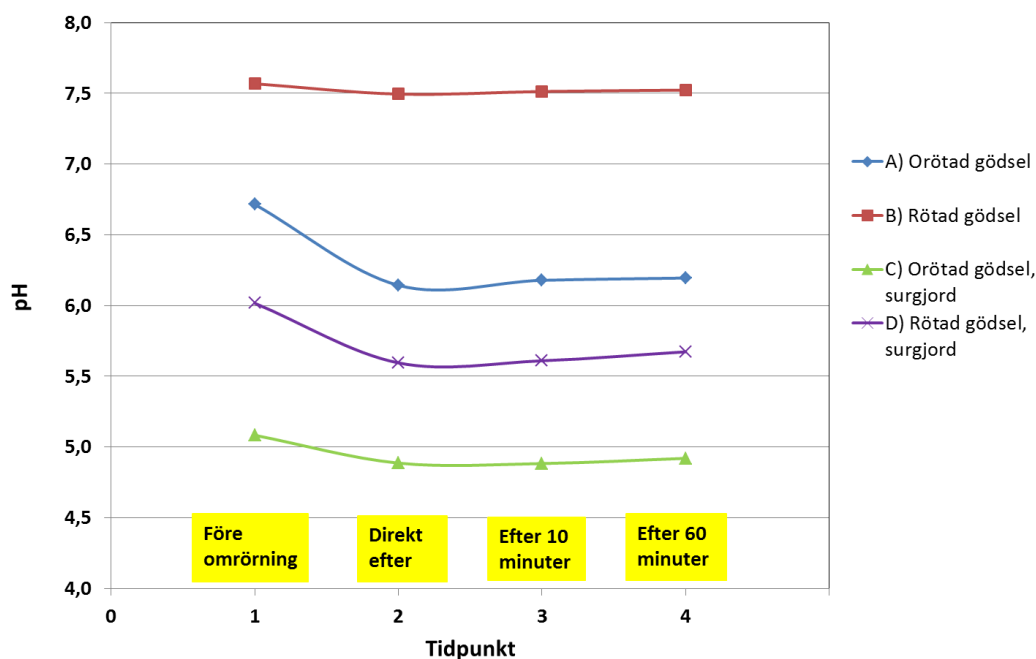
Figur 18. Exempel på typiska titreringskurvor för orötad respektive rötad gödsel vid sänkning av pH till 5,5 genom tillförsel av svavelsyra. Gödselproverna togs från samma gård som gödseln hämtades till pilotskalebehållarna ca tre veckor innan fyllningen. Svavelsyran var utspädd, medan svavelsyran som tillsattes i pilotskalan var koncentrerad.

I pilotskalan krävdes betydligt mindre mängder syra vid surgörning av gödseln för att komma ned i $\text{pH} < 5,5$. I medeltal åtgick 1,15 liter per m^3 gödsel (standardavvikelse 0,03) för de två behållarna i led C. Motsvarande syramängd för den rötade gödseln (led D) var 6,94 liter per m^3 rötad gödsel (standardavvikelse 0,48), dvs. nästan sju gånger så stor som för orötade gödseln. Gödseln hade vid start pH 6,6 och den rötade gödseln höll pH 8,0 innan surgörning uppmätt på icke-frost uttaget prov i samband med fyllningen, tabell 14. Det var ungefär samma värden uppmätt vid start direkt i den omrörda gödseln i pilotlagret, figur 19. Den orötade respektive rötade gödseln blev surgjorda till pH under 5,5 (5,0 respektive 5,1). I slutet av lagringen (ca fyra månaders lagring) var pH hos den surgjorda gödseln 5,4 och den rötade surgjorda gödseln 5,5, vilket betydde att gödseltyperna under dessa lagringsförhållanden inte hade buffrat gödseln i någon större grad utan pH -värdet förblev lågt. I gödseltyperna utan syra sjönk pH något under lagringen, vilket kan bero på processer i gödseln t.ex. antagligen till följd av ökade halter av flyktiga fettsyror i orötad gödsel (tabell 14), vilket ger sänker pH (Paul och Beauchamp, 1989). Den rötade gödseln hade mycket litet innehåll av VFA, vilket gör att det inte kan ha påverkat pH särskilt mycket.



Figur 19. Lagring av orötad och rötad nötflytgödsel, med och utan syra. Uppmätt pH-värde i gödseln vid start och slut samt den 24 augusti har utförts i väl omrörd gödsel. Mätvärdena däremellan har gjorts ca 5 cm ned under ytan, dvs. är inte lika representativt för hela gödselmängden. Standardavvikelseerna är inlagda som felstaplar för respektive mätpunkt (n=2).

I figur 20 visas resultatet av pH-mätningarna före och efter omrörning vid mätning ca 5 cm under ytan. Innan omrörningen var pH högre under ytan än efter omrörningen. Värdet efter omrörningen låg på samma nivå under den kommande timmen. För att få ett representativt pH-värde måste gödseln vara väl omrörd annars finns risken för att få felaktigt värde, i detta fall förhöjda pH-värden.

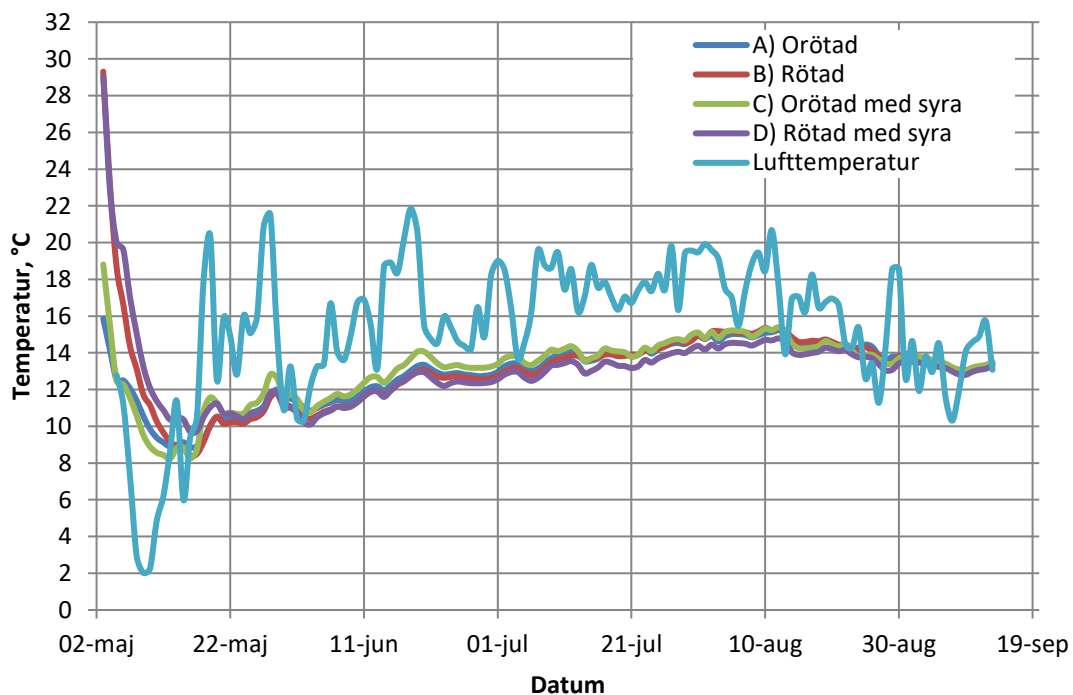


Figur 20. Resultat från pH-mätning i flytgödsellagren före och efter omrörning (tre tillfällen). Mätningen utfördes ca 5 cm under gödselytan.

3.3.3 Lagringsförhållanden

År 2017 var det en relativt sval sommar. Lufttemperaturen under lagringen visas i figur 21 (dygnsmedelvärden) och medeltemperaturen under hela mätperioden var 12,7 °C, tabell 15.

Vid fyllningen av behållarna hade rötresten temperaturen 33-34 °C och gödseln höll temperaturen 14,5 °C, figur 21. Totala nederbörden under mätperioden 5 maj till 29 augusti 2017 var 126 mm uppmätt vid Ultuna meteorologiska station och från fyllning 3 maj till tömning 13 september föll 156 mm regn. Trots inkommande regn i behållarna så sjönk i medeltal nivån i behållarna med 5 cm under lagringsperioden till följd av avdunstning.



Figur 21. Medeltemperaturen hos A) Orötad gödsel, B) Rötad gödsel, C) Orötad gödsel, surgjord och D) Rötad gödsel, surgjord under lagring samt lufttemperaturen (medeltal per dygn). Den 29 augusti utfördes sista mätningen och den 13 september avslutades lagringen.

Figur 21 visar att lufttemperaturen sjönk efter fyllningen och efter ca 6 dagar var dygnsmedeltemperaturen endast 2 grad C, vilket kylde av gödseln. Efter ca 2 veckor var dygnsmedeltemperaturen hos de olika gödselleden ungefär densamma, ca 10 grader C. När värmen kom i mitten av maj steg gödseltemperaturerna långsamt och var i medeltal över dygnet som högst ca 15 grader C. I tabell 16 visas medeltemperaturerna över mätperioden (116 dagar). Gödseln var varmare under ytan (övre nivån) än vid botten och högsta maximala temperaturerna registrerades i rötade gödseln som var surgjord. Det sker en värmeutveckling vid tillsatsen av syra, men det hade ingen bestående påverkan, figur 21.

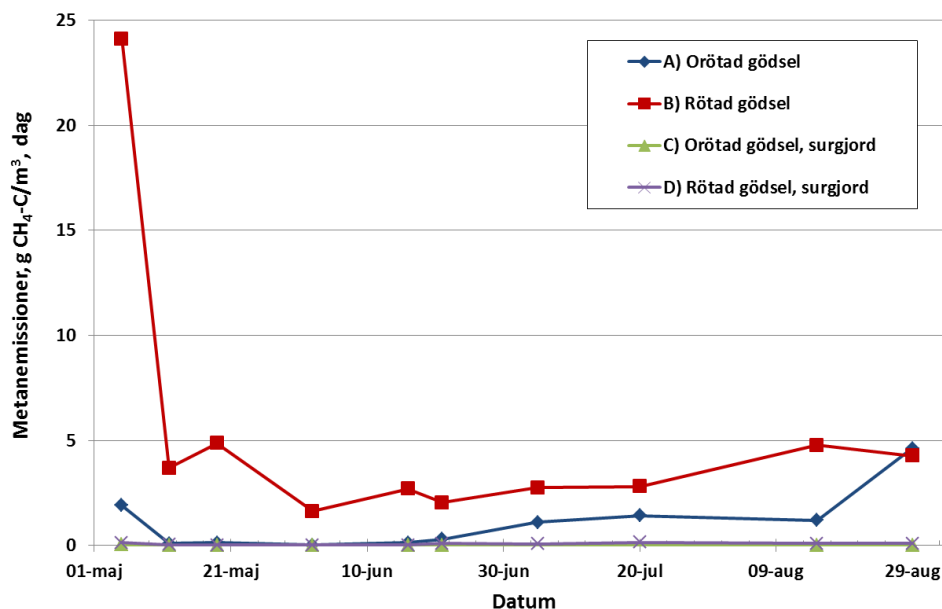
Tabell 16. Medeltemperaturer i luft och gödsel i pilotskalebehållare under mätperioden 116 dygn. A) Orötad nötflytgödsel, B) Rötad gödsel, C) Orötad gödsel, surgjord (pH<5,5) och D) Rötad gödsel, surgjord (pH <5,5).

	Luft, °C	Medeltemperatur i behållare, °C				Medeltemperatur övre nivå, °C				Medeltemperatur, nedre nivå, °C			
		A)	B)	C)	D)	A)	B)	C)	D)	A)	B)	C)	D)
Medel -tal	15,6	12,8	12,9	13,0	12,8	14,0	14,0	13,7	13,7	11,7	11,7	12,3	11,9
Max	29,1	15,7	18,3	15,9	22,3	17,0	19,5	17,1	24,5	14,5	17,1	14,6	20,0
Min	-4,7	8,3	8,2	6,6	8,1	7,9	8,0	5,2	7,0	8,7	8,3	8,0	9,2

3.3.4 Emissioner

3.3.4.1 Metan och koldioxid

Surgörningen hade god effekt när det gäller att minimera metanemissionerna både när gödseln var orötad och när den var rötad, se figur 22. Metanemissionerna från den surgjorda gödseln var mycket låga. De högsta emissionerna uppmättes från rötad gödsel utan syra och som år 2015 var emissionerna högst i början, men var betydligt lägre redan vid andra mättillfället. Den orötade gödseln hade mycket låga emissioner i starten av lagringen när det var relativt kallt, men i mitten av juni började emissionerna stiga svagt.



Figur 22. Metanemissioner (g CH₄-C per m³ och dag) under lagring av A) Orötad gödsel, B) Rötad gödsel, C) Orötad gödsel, surgjord och D) Rötad gödsel, surgjord under lagring, 116 dagar.

I Tabell 16 visas de kumulativa förlusterna och de visar signifikant ($p < 0,05$) ca fyra gånger så höga emissioner från den rötade gödseln jämfört med den orötade gödseln under lagringen från början av maj till slutet av augusti. Det överensstämmer med tidigare studier, när metanemissionerna från rötad gödsel i ett steg var ca 2,5 ggr högre än från ej rötad gödselblandning år 2015 (denna rapport) respektive ca 3 gånger i en

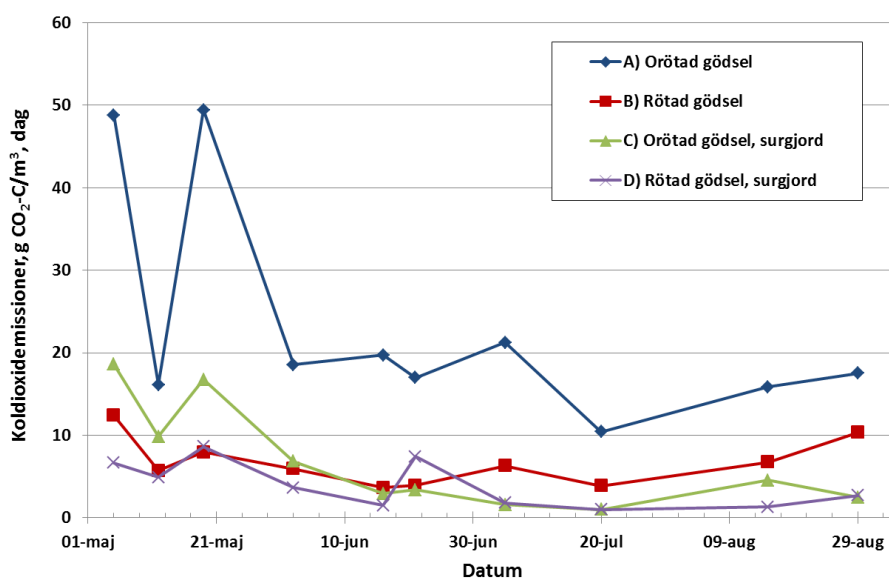
tidigare studie (Rodhe m.fl., 2013). Genom att surgöra till pH mindre än 5,5, minskade de kumulativa emissionerna signifikant ($p < 0,05$) med 99,7 % för den orötade gödseln respektive 98,1 % för den rötade gödseln. Det betyder att åtgärden var mycket effektiv när det gällde att minimera metangasavgången.

Tabell 16. Metanemissioner i medeltal per m^3 och dag, kumulativt per m^3 och kg VS i ursprunglig gödsel, samt beräknad andel av ursprungligt innehåll av kol (C) för lagrad (A) orötad gödsel, (B) rötad gödsel ett steg R1 och (C) rötad gödsel i två steg R2 under lagring 116 dagar. Även emissioner av koldioxid (CO_2).

Försöks- led	Metanemissioner			Koldioxid		Förlust av kol (C), % av Tot-C	
	$\text{g CH}_4\text{-C}$ $\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$	$\text{g CH}_4\text{-C}$ m^{-3}	$\text{g CH}_4\text{-C}$ kg^{-1}VS	$\text{g CO}_2\text{-C}$ m^{-3}	$\text{g CO}_2\text{-C}$ kg^{-1}VS	$\text{CH}_4\text{-C}$	$\text{CO}_2\text{-C}$
A)	1,00 ^b	115,5 ^b	1,53 ^b	2391,5 ^a	31,6 ^a	0,28	5,71
B)	3,97 ^a	460,7 ^a	10,15 ^a	701,3 ^b	15,4 ^b	1,78	2,70
C)	0,00 ^c	0,3 ^c	0,00 ^c	618,8 ^b	8,2 ^b	0,00	1,48
D)	0,08 ^c	8,8 ^c	0,19 ^{bc}	375,3 ^b	8,2 ^b	0,03	1,45
Samman- vägda medelfel	0,16	18,1	0,37	205,3	3,3		

^{a, b, c} Medelvärden med olika bokstäver inom respektive kolumn har en signifikant skillnad $p < 0,05$

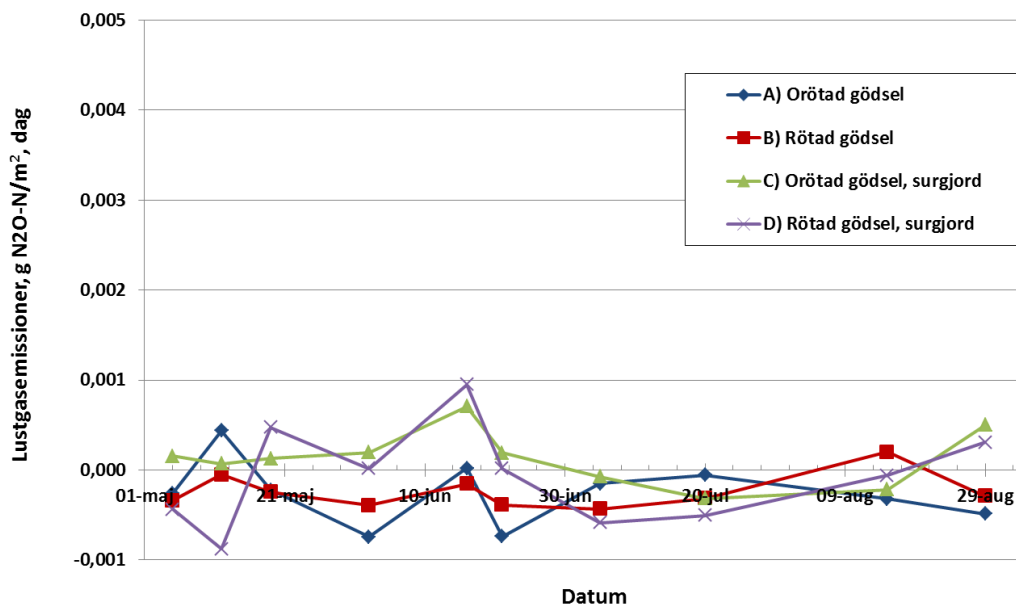
Även koldioxidemissionerna mättes för att få information om aktiviteter som genererar denna gas, trots att den inte betraktas som växthusgas i detta sammanhang, figur 23. I detta fall var emissionerna signifikant ($p < 0,05$) högre från orötad gödsel än från rötad gödsel, vilket också överensstämmer med resultaten från 2015 (denna rapport). Efter mer än ett dygn efter surgörningen var det signifikant lägre koldioxidemissioner än när ingen syra hade satts till, tabell 16. Resultaten från år 2 visar att det avgår en hel del koldioxid direkt efter tillsats av syra, vilket också bidrar till skumbildningen. Så förmodligen har redan mycket koldioxid avgått från de surgjorda gödselslagen innan första emissionsmätningen.



Figur 23. Koldioxidemissioner (g CO₂-C per m³ och dag) under lagring av A) Orötad gödsel, B) Rötad gödsel, C) Orötad gödsel, surgjord och D) Rötad gödsel, surgjord under lagring, 116 dagar.

3.3.4.2 Lustgas

Emissionerna av lustgas var i stort sett obefintliga, vilket syns i figur 24 och tabell 17. Lustgas uppstår främst från gödsel där det bildats svämtäcke och som tidigare beskrivits under lagringsförhållanden var gödselns vätskeyta öppen, utan något organiskt material på ytan.



Figur 24. Lustgasemissioner (g N₂O-N per m² och dag) från lager med A) Orötad gödsel, B) Rötad gödsel, C) Orötad gödsel, surgjord och D) Rötad gödsel, surgjord under lagring, 116 dagar.

Det fanns inte några signifikanta skillnader i kumulativa emissioner, tabell 17.

Tabell 17. Kumulativa lustgasemissioner (g N₂O-N/m² respektive g N₂O-N/m³) och emissionsfaktorer (EF_{N₂O}) i procent av N i lager vid start lagring, samt sammanlagda klimatpåverkan (GWP₁₀₀) från metan och lustgas i kg CO₂ekv./m³.

Försöksled	Lustgasemissioner		
	g N ₂ O-N m ⁻²	g N ₂ O-N m ⁻³	EF _{N₂O} , %
A) Orötad gödsel	-0,03	-0,03	-0,001
B) Rötad gödsel	-0,03	-0,02	-0,001
C) Orötad gödsel, surgjord	0,01	0,01	0,000
D) Rötad gödsel, surgjord	-0,01	-0,01	0,000
Sammanvägda medelfel	0,03 (n.s.)	0,03 (n.s.)	

n.s.; ej signifikant skillnad (p>0,05)

3.3.4.3 Globala klimatuppvärmningen, GWP₁₀₀

I tabell 18 visas klimatpåverkan för metan och lustgas enskilt och sammanlagt uttryckt som koldioxidekvivalenter (kg CO₂ekv./m³). Här syns tydligt att det är metanemissionerna som enbart påverkar klimatuppvärmningen.

Tabell 18. Klimatpåverkan (GWP₁₀₀) från metan respektive lustgas samt sammanlagt i kg CO₂ekv./m³ gödsel beräknat från de kumulativa emissionerna av respektive gas.

Försöksled	Metan (CH ₄)	Lustgas (N ₂ O)	CH ₄ och N ₂ O
	kg CO ₂ ekv. m ⁻³	kg CO ₂ ekv. m ⁻³	Kg CO ₂ ekv. m ⁻³
A) Orötad gödsel	3,9 ^b	-0,01	3,84 ^b
B) Rötad gödsel	15,4 ^a	-0,01	15,35 ^a
C) Orötad gödsel, surgjord	0,0 ^c	0,00	0,01 ^c
D) Rötad gödsel, surgjord	0,3 ^c	0,00	0,29 ^c
Sammanvägda medelfel	0,60	0,01 (n.s.)	0,61

^{a, b, c} Medelvärden med olika bokstäver inom respektive kolumn har en signifikant skillnad p<0,05

3.3.5 Sammanfattning av resultaten år 3

- Tillsatsen av svavelsyra var en mycket effektiv metod för att minska metanbildningen, då metanemissionerna minskade med mer än 90 procent med syratillsats både för orötad som rötad gödsel.
- Metanemissionerna från rötad gödsel var ca 4 gånger högre än från ej rötad gödsel under sommarlagring.
- Lustgasemissionerna var i samtliga fall obefintliga.
- Syrabehovet var 1,15 liter syra per ton orötad gödsel, medan motsvarande syramängd för den rötade gödseln var 6,94 liter per m³ rötad gödsel.

4 Sammanfattande diskussion

Tidigare studier visar att metan- och lustgasemissioner är högst på sommaren, medan under kalla årstiden är emissionerna mycket små. För att få ut så mycket kunskap som möjligt för forskningsmedlen har därför här olika åtgärder endast utvärderats under varma delen av året, från vår till höst, ca 4 månader. Emissionerna har ställts i förhållande till ingående gödselns totala innehåll av kol respektive kväve och dessa procenttal representerar då inte ett medeltal över året. Emissionsfaktorer för hela år har tidigare tagits fram i året-runt studier, när lagrets dynamik simulerats gällande tillförsel av färsk gödsel och delvis tömning av lager vid spridning, för nötflytgödsel (Rodhe m.fl., 2008) respektive för svinflytgödsel (Rodhe m.fl., 2012).

Föreliggande studier av emissioner har utförts i olika skalor. Första året placerades flaskor i pilotskalebehållarna med samma gödsel och temperatur som i pilotskalan. Vid en rangordning av metanemissionerna var den i storleksordning densamma mellan de tre olika gödseltyperna nämligen örötat < rötat R2 < rötat R1. I absoluta tal var dock de kumulativa emissionerna lägre från flaskorna (figur 13) jämfört med pilotskalan (tabell 5). Som tidigare diskuterats, så rör det sig om olika system, där pilotskalan efterliknar verkliga förhållanden som att gödseln är utsatt för omgivande klimat med nederbörd, solinstrålning och vind medan gödseln i flaskorna inte har något luftutbyte ovanför gödselytan under hela lagringen. Det är därmed skillnader i volymförhållanden mellan gödsel : luft och gödseln i flaskorna förändras inte på samma sätt som i pilotskalan under lagringen.

Andra året utfördes emissionsmätningar i fullskalelager med ramar och dynamisk kammare, figur 6. Det gav möjlighet att studera emissioner från lager med naturligt svämtäcke i djup behållare med kontinuerlig tillförsel av gödsel. Det innebar också att det gick att visa att från ett slätt svämtäcke, trots att det är tjockt, att det gav små lustgasemissioner. En slutsats är därmed att genom att skapa ett slätt svämtäcke t.ex. genom använda finhackad halm som strö, går det att begränsa lustgasemissionerna samtidigt som svämtäcket hämmar ammoniakavgången. Denna ”upptäckt” hade kanske inte gjorts, om inte steget tagits ut i verkligheten. Det känns också angeläget att göra uppföljande studier i svinggödsel med svämtäcke, eftersom det tidigare främst varit från den gödseln som det uppmätts betydande lustgasemissioner (Rodhe m.fl., 2012).

När det gäller metangasemissionerna från fullskalelagret jämfört med tidigare uppmätta i pilotskala, så var dygnsvärdena i fullskalan som högst 35 g CH₄-C/m³ och dygn (figur 14). Det är betydligt högre än vad som tidigare uppmätts i pilotskala, där de högsta dygnsvärdena varit ca 3,5 g CH₄-C/m³ och dygn (Rodhe m.fl., 2008, bild 41). Förhållandena i pilotskalan var ungefär desamma som i fullskalan när det gäller regelbunden tillförsel med färsk gödsel och temperatur. En trolig förklaring till skillnaden är sprickbildningen i fullskalan som uppstod vid nedtryckning av ramarna med mätytan 0,55 m² i svämtäcket, se figur 6, till vänster. Eftersom övriga ytan av svämtäcket verkade vara väldigt tät, kom den bildade gasen att använda sprickorna som ”skorstenar”, och att den mesta gasen kanaliserades vid ramens sidor och i eventuella sprickor i ytan innanför ramen. Ramarna borde ha placerats i lagret direkt efter att gödselomblandaren stängts av för att få en bättre anslutning mellan ram och gödsel och minskad sprickbildning vid nedtryckning av ramarna. I stort är det nog så att ramarna fungerar bäst i gödsel med liten svämtäckesbildning för att kanteffekterna inte ska bli

stora. I pilotskalan var svämtäckets yta (2 m²) orörd efter fyllningen och gödseln kunde ansluta till väggarna efter fyllningen.

En åtgärd för att få lägre metanemissioner från den rötade gödseln i lager är att förlänga utrotningstiden, dvs. den hydrauliska uppehållstiden i rötammaren. Studierna år 1 visade att vid en fördubblad uppehållstid, 48 dagar istället för 24 dagar, minskade metanemissionerna från lagret med 30 procent. Upphållstiden i rötammaren för gödseln på gårdsanläggningar i Sverige är idag relativt kort, i medeltal strax över 30 dagar (Ahlberg-Eliasson m.fl., 2017). Det kan jämföras med gårdsanläggningar i Tyskland, som har i medeltal en uppehållstid av mer än det dubbla (FNR, 2010). I Tyskland finns också regler om uppehållstider, samt myndigheterna ställer ofta också krav på gastäta tak över primära lagret, så att biogasen kan samlas upp (Jan Liebetrau, muntlig uppgift). Planen var också att studera rötrestlager med uppsamling av metangas dels för att följa emissionerna under året, dels summera emissionerna under lång tid. Men tyvärr var det inte möjligt att genomföra detta pga. att studieobjekt saknades. Det var inte heller helt klart vilken mätteknik som hade klarat ett varierande luftflöde och en fuktig rågas. Under förutsättning att ett gastätt tak förblir tätt så innebär åtgärden inga metanemissioner från lagret och i stort har biogasanläggningar med gastäta lager mycket lägre emissioner än övriga anläggningar visar studier utförda i Tyskland (Liebetrau et al., 2013).

Grundläggande är att temperaturen har stor betydelse för metanemissionerna, vilket visades i laboratorieskala år 1. Vid ökad temperatur ökade metanproduktionen exponentiellt för rötad gödsel medan för orötad gödsel var ökningen betydligt mindre vid ökad temperatur. De teoretiska värmebalansberäkningarna för lager med rötad gödsel visade att beskuggning av gödselytan eller täckning av lager med vitt tak bör kunna reducera denna uppvärmning kraftigt på våren eftersom värmeinstrålningen från solljus till gödsellager kan förklarade största delen av gödselns uppvärmning.

Studierna under första och sista året visade att metanemissionerna var signifikant större från gödseln när den var rötad än om den var orötad. Sammanlagda förlusterna av metan var 2,5 respektive 4 gånger så höga från den rötade gödseln under sommarlagringarna (ca fyra månader). Detta styrker en tidigare studie där emissionerna var ca 3 gånger så höga från rötad nötflytgödsel jämfört med orötad gödsel (Rodhe m.fl., 2013). Det betyder att det är speciellt viktigt att sätta in åtgärder vid lagring av rötad gödsel för att begränsa utsläppen av metan och därmed minska klimatpåverkan.

Går det genom mätningar av olika parametrar hos gödsel, orötad eller rötad att uppskatta metanemissionerna från lager? För orötad gödsel bestämdes den maximala metanproduktionsförmågan (B_0) genom tillsats av ymp och inkubering under ca 100 dagar vid 37 °C. B_0 efterliknar förhållandena i rötammaren och kan därmed ge potentialen hos substratet att generera metangas i rötammaren. Med samma metod bestämdes den s.k. restgaspotentialen hos rötad gödsel, men då utan speciell tillsats av ymp eftersom rötade produkter är i sig rika på metanbildare. Denna restgas(metan)-potential bestämd vid 20°C (FNR, 2010) efterliknar mer förhållandena i lagret. Den kan därmed ge potentialen för metanemissioner från lager, vilket våra laborieförsök visar. Där tillsattes ingen ymp varken till den orötade gödseln eller till de rötade gödselslagen och då var restgaspotentialen relativt desamma som emissionerna från pilotlagren. Emissionerna var dock i absoluta tal inte i samma storleksordning, vilket tidigare diskuterats.

Metanproduktionen från en rötchammare mäts inte alltid med en volymflödesmätare och därför beräknas volymen metan ofta indirekt utifrån producerad elproduktion (Liebetrau m.fl., 2013). Resultat från denna rapport visar att metanemissionerna från lager under sommaren var 10,2 % av producerad mängd metan från rötchammare vid enstegsrötning under 24 dagar respektive 5,5 % vid tvåstegsrötning under 48 dagar. På årsbasis blir procenttalen betydligt lägre eftersom emissionerna minskar under den kalla årstiden (Rodhe m.fl., 2013). I tyska studier av tio biogasanläggningar var motsvarande siffror för öppna lager 0,22 till 11,2 % av tillgodogjort metan (Liebetrau m.fl., 2013). Dessutom mätte de emissioner från kraftvärmeenheter, som uppgick till 0,4 till 3,28 % av tillgodogjort metan. I dessa anläggningar var stallgödsel oftast en mindre del av substratet, som istället dominerades av energigrödor.

Ekonomiskt bästa metod för att minska växthusgaser från lager är svårt att säga eftersom det beror på förutsättningarna och tillgänglig teknik på marknaden. Managementåtgärder som att tömma lager inför varma årstiden eller användning av finhackad halm bör vara kostnadseffektiva. Teknik för att surgöra gödsel finns på marknaden och där kommer både ekonomi och miljöpåverkan bestämmas i ett pågående EU-Interregprojekt ”Baltic Slurry Acidification” (avrapporteras februari 2019). Kostnaderna för andra åtgärder som ökad uppehållstid och gastätt tak på biogasanläggningar kräver anläggningsspecifika data och mer omfattande beräkningar.

5 Sammanfattande slutsatser

Generellt gäller att temperaturen har stor betydelse för metanemissionerna från lager. Tidigare rekommendation att ha lite gödsel i lager under sommaren gäller fortsatt för att begränsa emissionerna.

Beskuggning av gödselytan eller täckning av lager med vitt tak kan vara andra åtgärder som reducerar metanemissionerna genom minskad uppvärmning av gödseln på våren och sommaren. Beräkningar visar att värmeinstrålningen från solljus till gödsellager kan förklara största delen av gödselns uppvärmning på våren.

Rötad gödsel kan vid ogynnsamma förhållanden, som exempelvis hög temperatur under sommaren, ge högre metanemissionerna jämfört med orötad gödsel, eftersom metanbildningsaktiviteten har stimulerats genom rötningen. En åtgärd för att få lägre metanemissioner från den rötade gödseln är att förlänga utrotningstiden, dvs. den hydrauliska uppehållstiden i rötchammaren. Det mest effektiva är dock att ha gastätt tak på lagret så att biogasen kan samlas upp, vilket också totalt ökar effektiviteten hos anläggningen.

Surgörning av flytgödsel med svavelsyra för att minimera metangasemissionerna från lager är en mycket effektiv metod, som kan reducera emissionerna med mer än 90 procent både för orötad och för rötad gödsel. Surgörning är också en metod för att minska ammoniakavgången. För gödselslag där det inte bildas naturligt svämtäcke, vilket ofta är fallet för rötad gödsel, kan surgörning vara en alternativ metod till tak eller skapade svämtäcken.

Användning av finhackat halmströ i fullskalelager är en åtgärd som kan skapa ett slätt och tätt svämtäcke på nötflytgödsel. Detta förhindrar penetration av luft och därmed

förhindras lustgasbildning. En annan metod för att hämma lustgasbildningen i svämtäcke eller från fastgödsel kan vara att surgöra ytan med t.ex. svavelsyra. Det finns dock ingen utvecklad teknik för detta idag och det kan vara svårt att avgöra svämtäckets potential för lustgasbildning.

6 Referenser

- Ahlberg-Eliasson K., Nadeau E., Levén L., A. Schnürer, 2017. Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. *Biomass and Bioenergy* 97, 27-37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.002>
- Amon B., Kryvoruchko V., Amon T., Zechmeister-Boltenstern S., 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112, 153-162.
- Castillo M. d. P., 2012. Ökad biogas produktion från flytgödsel. www.lantbruksforskning.se
- Christensen, M.L. och Sommer, S.G., 2013. Slurry characterization and inorganic chemistry. In: *Animal Slurry Recycling: Treatment and Management*. Editors: Sommer, S.G., Christensen M.L., Schmidt, T. och Jensen L.S. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, United Kingdom, pp. 41-65.
- Clemens J., Trinborn M., Weiland P., Amon B., 2006. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112 171–177.
- Edström M., Castillo M.-P. Ascue J., Andersson J., Rogstrand G., Nordberg Å., Schnürer A., 2014. Strategies for improve anaerobic digestion of substrates with high content of lignocellulose and nitrogen (In Swedish). Projektnummer WR-61. Waste Refinery.
- Energimyndigheten, 2014. Produktion och användning av biogas och rötresten år 2013.
- FNR, 2010. Biogas Messprogram II. 61 Biogasanlagen Im Vergleich. ISBN 978-3-9803927-8-5. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Gale G.E. & O' Dogherty M.J.O. 1982. An apparatus for the assessment of the length distribution of chopped forage. *Journal of Agricultural Engineering Research* 27, p 35-43.
- Georgacakis D., Sievers D.M. and Iannotti, E.L. 1982. Buffer stability in slurry digesters. *Agricultural Wastes* 4:427-441.
- Holmgren M.A., Willén A., Olsson H. & Rodhe L., 2013. Värdering och utveckling av mätmetoder för bestämning av metanemissioner från biogasanläggningar – Försök i pilotskala. Rapport Nr 2013-04, Svenskt Vatten Utveckling, Stockholm.
- Hushållningssällskapet, 2014. Olpers biogasanläggning i Färila, Ljusdals kommun, Hälsingland. Informationsblad från projektet ”Utvärdering av biogasanläggningar på gårdsnivå”. <http://hushallningssallsskapet.se/wp-content/uploads/2015/04/810.pdf>
- 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 Slurry Management. Intergovernmental Panel on Climate Change. IGES, Japan. ISBN 4-88788-032-4.
- IPCC, 2007. Climate change 2007 - Mitigation of climate change. (4th assessment report). Working group III report. In B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Muha I., Linke B., Wittum G., 2015. A dynamic model for calculating methane emissions from digestate based on co-digestion of animal slurry and biogas crops in full scale German biogas plants. *Bioresource Technology* 178, 350-358. Doi: 10.1016/j.biotech.2014.08.060
- Liebetrau J., Reinelt T., Clemens J., Hafermann C., Friehe J., Weiland P., 2013. Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. *Water Science Technology* 67(6), 1370-9. doi: 10.2166/wst.2013.005.
- Misselbrook T., Hunt J., Perazzolo F., and Provolo G., 2016. Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Slurry Storage: Impacts of Temperature and Potential Mitigation through Covering (Pig Slurry) or Acidification (Cattle Slurry). *JEQ* 45, 1520-1530.

- NV, 2013. National Inventory Report Sweden 2013. Greenhouse Gas Emission Inventories 1990–2011. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol Sweden's National Inventory Report 2013. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Paul J.W. & Beauchamp E.G., 1989. Relationship between volatile fatty acids, total ammonia, and pH in slurry slurries. *Biological Wastes* 29, 313-318.
- Pedersen S., Andersen A.J., Eriksen J., 2012. Effects of cattle slurry acidification on ammonia and methane evolution during storage. *Journal of environmental quality* 41, 88-94.
- Petersen S.O, Højberg O., Poulsen M., Schwab C. and Eriksen J., 2014. Methanogenic community changes, and emissions of methane and other gases, during storage of acidified and untreated pig slurry. *Journal of Applied Microbiology* 117, 160–172.
- Peterson F., Ringblom L., 1985. Solfångare för varmvattenberedning. Institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik, Kungliga Tekniska Högskolan. Stockholm.
- Sommer S.G., Petersen S.O., Sögaard 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. & Möller H.B., 2007. Methane and carbon dioxide emissions and nitrogen turnover during liquid slurry storage. *Nutr Cycl Agroecosyst* 78, 78:27-26.
- Rodhe L. & Pell M., 2005. Täckt ytmyllning av flytgödsel i vall – teknikutveckling, ammoniakavgång, växthusgaser och avkastning. JTI-rapport Lantbruk & Industri nr 337, JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.
- Rodhe L., Ascue, J., Tersmeden M., Ringmar A. och Nordberg Å., 2008. Växthusgasemissioner från lager med nötflytgödsel. JTI rapport Lantbruk och Industri nr 370.
- Rodhe L.K.K., Abubaker J., Ascue J., Pell M. & Nordberg Å., 2012. Greenhouse gas emissions from pig slurry during storage and after field application in northern European conditions. *Biosystems Engineering* 113, 379–394.
- Rodhe L., Ascue J. Tersmeden M., Willén A., Nordberg Å, Salomon E., Sundberg M. 2013. Växthusgaser från rötad och orötad nötflytgödsel vid lagring och efter spridning - samt bestämning av ammoniakavgång och skörd i vårkorn. JTI-rapport Lantbruk & Industri 413.
- Rodhe L.K.K., Ascue J., Willén A., Vegerfors Persson B., Nordberg Å., 2014. Greenhouse gas emissions from storage and field application of anaerobically digested and non-digested cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 199, 358-368, DOI: 10.1016/j.agee.2014.10.004
- Schnürer A. & Nordberg Å. 2008. Ammonia, a selective agent for methane production by syntrophic acetate oxidation at mesophilic temperature. *Wat. Sci. & Technol.*, vol. 57, no 5, 735-740.
- Solomon S., Qin D., Manning M. Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., and Miller H.L. (eds.). 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- Thyselius, L., 1974. Omblandning av flytgödsel. Meddelande nr 355, Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Tyskland), 2011. VDI 3880: Olfactometry - Static sampling.

Personligt meddelande:

Jan Liebetrau, verksamhetschef DBFZ; German Biomass Research Center (2018-02-27)

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 7033, 750 07 UPPSALA
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Jordbruk och livsmedel
RISE Rapport 2018:18
ISBN: