



# Biogasproduktion vid samrötning av substrat tillgängliga vid lantbruk

Småskalig rötning vid Lillerudsgymnasiet

---

Biogas production in co-digestion of substrates available in agriculture: Small-scale digestion at Lillerudsgymnasiet

---

Cecilia Svensson

---

Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap

---

Civilingenjörprogrammet med inriktning mot energi- och miljöteknik

---

30 hp

---

Handledare: Karin Granström

---

Examinator: Jonas Berghel

---

2023-06-16

---



## Sammanfattning

Världen är i dagsläget starkt beroende av fossila bränslen och användningen av dessa leder till en ökad global uppvärmning. En av lösningarna på detta miljöproblem är biogas. Biogas produceras genom anaerob rötning av organiskt material och kan användas till el- eller värmeproduktion, uppgraderas och användas som fordonsbränsle eller induceras i industrin.

Lillerudsgymnasiet är en naturbruksskola som har jordbruksdjur, matavfall och rester från grödor. Skolan är intresserad av att bygga en gårdsanläggning för biogasproduktion där de kan röta olika substrat för att producera el eller värme för egen användning.

Syftet med detta examensarbete är att ta reda på biogaspotentialen vid samrötning av olika substrat som finns tillgängliga vid lantbruk. Målet är att undersöka olika scenarier för att kunna ge en rekommendation över hur Lillerudsgymnasiet bör samröta sitt substrat för att optimera sitt biogasutbyte.

Två olika rötningsexperiment utfördes i en AMPTSII-reaktor, där tre olika fall kunde rötas per experiment. Substraten rötades i olika kombinationer och de substrat som undersöktes var hästgödsel med barrträdsspån, hästgödsel med halm, kogödsel, grigödsel, matavfall, ensilage och spannmålsrester. Det togs även prover över torrsubstans, glödförlust, pH, ammonium, flyktiga fettsyror och totalt organiskt kol innan och efter rötning. Metangasmängden per kilo substrat och per år undersöktes och beräknades för de olika substratblandningarna.

Resultatet visar att högst metangasutbyte per gram VS (organiskt material) fås när substraten blandas och rötas utifrån ett optimalt C/N-värde, utbytet blir då 218 Nml/g VS. Näst högst utbyte fås då substraten blandas och rötas i samma förhållande som de finns tillgängliga på Lillerudsgymnasiet och hästgödsel med barrträdsspån har exkluderats, utbytet blir då 216 Nml/g VS. Lägst metangasutbyte per gram VS fås när substraten blandats och rötats i samma förhållande som det finns tillgängligt på skolan men med en maximal mängd hästgödsel med halm. Metangasutbytet är då 156 Nml/g VS.

Resultatet visar även att det högsta biogasutbytet per kilo substrat, på Lillerudsgymnasiet, fås när substraten blandas för att få ett optimalt C/N-värde, metangasutbytet är då 48 NL/kg substrat. Högst metangasmängd per år, på skolan, fås då substratet rötas i samma förhållande som det finns tillgängligt på skolan. Metangasmängden är då cirka 75 200 Nm<sup>3</sup>/år.

Mängden metaller (krom, koppar, zink, nickel, kvicksilver, kadmium och bly) i rötresterna är långt under den maximalt tillåtna halten för att rötresterna ska anses lämpliga som biogödsel, enligt SPCR 120-certificering.

Resultatet visar att cirka 10% av all gödsel från häst, gris och ko i Sverige rötas till biogas, vilket betyder att det finns en stor potential att öka biogasproduktionen från lantbruket i Sverige. I Kina används 19% av biogasproduktionspotentialen på landsbygden, vilket visar att det finns möjlighet att öka biogasproduktionen även där.

Avslutningsvis rekommenderas Lillerudsgymnasiet att röta sitt substrat i den blandning som fås när C/N-halten optimeras, om skolan kan få tillgång till en större mängd matavfall. Annars bör substratet rötas i det förhållande det finns tillgängligt på Lillerudsgymnasiet. Slutligen rekommenderas skolan att utesluta hästgödseln med barrträdsspån från rötningen.

## Abstract

The world is currently heavily dependent on fossil sources and the use of fossil fuels leads to increased global warming. One of the solutions to this environmental problems is biogas. Biogas is produced through anaerobic digestion of organic material and can be used for electricity or heat production, upgraded and used as vehicle fuel or induced in the industry.

Lillerudsgymnasiet is a school that has farm animals, food waste and crop residues. The school is interested in building a small-scale biogas plant for biogas production where they can digest different substrates to produce electricity or heat for their own use.

The purpose of this study is to discover the biogas potential during co-digestion of different substrates that are available in agriculture. The goal is to investigate different scenarios to be able to give a recommendation on how Lillerudsgymnasiet should co-digest its substrate in order to optimize its biogas yield.

Two different digestion experiments were carried out in an AMPTSII-reactor, where three different cases could be digested per experiment. The substrates were digested in different combinations and the substrates investigated were horse manure with softwood shavings, horse manure with straw, cow manure, pig manure, food waste, silage and crop residues. Samples were also taken for total solids, volatile solids, pH, ammonium, volatile fatty acids and total organic carbon before and after digestion. The amount of methane gas per kilogram substrate and per year was investigated and calculated for the various substrate mixtures.

The result shows that the highest methane yield per gram VS (organic material) is obtained when the substrates are mixed and digested based on an optimal C/N value, the yield is then 218 Nml/g VS. The second highest yield is obtained when the substrates are mixed and digested in the same ratio as they are available at Lillerudsgymnasiet and horse manure with softwood shavings has been excluded, the yield is then 216 Nml/g VS. The lowest methane yield per gram VS is obtained when the substrates are mixed and digested in the same ratio as is available at the school but with a maximum amount of horse manure with straw. The methane yield is then 156 Nml/g VS.

The result also shows that the highest biogas yield per kilogram of substrate, at Lillerudsgymnasiet, is obtained when the substrates are mixed to obtain an optimal C/N value, the methane gas yield is then 48 NL/kg substrate. The highest amount of methane gas per year, at the school, is obtained when the substrate is digested in the same ratio as is available at the school. The amount of methane gas is then approximately 75,200 Nm<sup>3</sup>/year.

The amount of metals (chromium, copper, zinc, nickel, mercury, cadmium and lead) in the digestate is far below the maximum permitted content for the digestate to be considered suitable as biofertilizer, according to SPCR 120 certification.

The result shows that approximately 10% of all manure from horses, pigs and cows in Sweden is digested into biogas, which means that there is a great potential to increase biogas production from agriculture in Sweden. In China, 19% of the biogas production potential is used in rural areas, which shows that there is an opportunity to increase biogas production there as well.

In conclusion, Lillerudsgymnasiet is recommended to digest its substrate in the mixture obtained when the C/N content is optimized, if the school can have access to a larger amount of food waste. Otherwise, the substrate should be digested in the ratio it is available at Lillerudsgymnasiet. Finally, the school is recommended to exclude the horse manure with softwood shavings from the decomposition.

## Förord

Detta examensarbete har redovisats muntligt för en i ämnet insatt publik. Arbetet har därefter diskuterats vid ett särskilt seminarium. Författaren av detta arbete har vid seminariet deltagit aktivt som opponent till ett annat examensarbete.

Ett stort tack vill ges till Ann-Charlotte Jakobsson Åhs vid Lillerudsgymnasiet för sitt engagemang och sin hjälpsamhet. Ett tack vill även ges till arbetets handledare Karin Granström för att hon har hjälpt till med sin erfarenhet och kunskap. Slutligen vill även ett tack ges till personalen på Biogasbolaget i Karlskoga för deras hjälp med material inför rötningsexperimenten.

## Nomenklatur

**Anaerob** – Utan tillgång till syre.

**Biogas** – En gas som framställs av organiskt material och består av 60 – 70 % metan ( $\text{CH}_4$ ) och 40 – 30 % koldioxid ( $\text{CO}_2$ ).

**C/N-halt** – Mängden kol (C) delat på mängden kväve (N). Kol/kväve-kvoten påverkar biogaspotentialen.

**Fordonsgas** – Biogas som har blivit renad från koldioxid (s.k. uppgraderad) och består till 97 % av metan.

**Metangas** – En gas som enbart består av metan ( $\text{CH}_4$ ).

**Normalmilliliter** (Nml) – En milliliter gas vid atmosfärstryck och  $20^\circ\text{C}$ .

**TS (Total solids/Torrsubstans)** – Mängden av ett ämne efter att allt vatten har avlägsnats, med andra ord mängden torrt ämne.

**VFA (Volatile fatty acids)** – Flyktiga fettsyror.

**VS (Volatile solids/Glödförlust)** – Mängden av ett ämne som förbränns vid  $550^\circ\text{C}$ , kan användas som ett mått på innehållet av organiska ämnen.

**Substrat** – Material som förs in i en process, i detta examensarbete en biogasprocess. Ur detta material utvinns biogas.

**Ymp** – Vanligtvis slam som kommer ut från en rötkammare i en verksam biogasprocess och innehåller aktiva mikroorganismer. Ymp behövs när en ny rötningsprocess startar.

**S<sub>Förh.</sub>** – Här: Ett rötningsfall där allt substrat rötas i samma förhållande som det finns tillgängligt på Lillerudsskolan.

**S<sub>Förh. s.</sub>** – Här: Ett rötningsfall där allt substrat rötas i samma förhållande som det finns tillgängligt på Lillerudsskolan med undantag från att mängden hästgödsel med spån är noll.

**S<sub>C/N</sub>** – Här: Ett rötningsfall där substratet har blandats för att få en optimal C/N-halt.

**S<sub>C/N B</sub>** – Här: Ett rötningsfall där substratet har blandats för att få en optimal C/N-halt, detta fall är ett andra försök av S<sub>C/N</sub>.

**S<sub>C/N a.j.</sub>** – Här: Ett rötningsfall där substratet har blandats för att få en optimal C/N-halt och de vatten som substratet blandats med är avjoniserat.

**S<sub>Förh. HG</sub>** – Här: Ett rötningsfall där allt substrat rötas i samma förhållande som det finns tillgängligt på Lillerudsskolan men med en maximal mängd hästgödsel med halm.

# Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
2 Syfte och mål.....	2
3 Bakgrund .....	2
3.1 Lillerudgymnasiet .....	2
3.2 Biogasprocess .....	3
3.2.1 Hygienisering .....	4
3.2.2 Röttningsprocess .....	4
3.2.3 Rötrest .....	5
3.2.4 Parametrar som påverkar substratens biogaspotential .....	6
3.3 Gårdsbiogasanläggning.....	6
3.4 Tidigare studier.....	8
4 Metod.....	9
4.1 Substrat och ymp .....	9
4.2 Provtagning och beräkning innan rötning.....	10
4.3 Rötning .....	11
4.3.1 Rötningsexperiment 1 .....	12
4.3.2 Rötningsexperiment 2 .....	13
4.3.3 T-test .....	15
4.4 Metangasutbyte, per kg substrat och per år .....	15
4.5 Provtagning och beräkning efter rötning .....	15
4.6 Känslighetsanalys .....	16
5 Resultat.....	16
5.1 Sammansättning och innehåll innan rötning.....	16
5.2 Rötning .....	17
5.2.1 Rötningsexperiment 1 .....	17
5.2.2 Rötningsexperiment 2 .....	19
5.2.3 T-test .....	20
5.3 Metangasutbyte, per kg substrat och per år .....	21
5.4 Sammansättning och innehåll efter rötning .....	22
5.5 Nationell och internationell biogaspotential.....	23
5.6 Känslighetsanalys .....	24
6 Diskussion .....	24
6.1 Sammansättning och innehåll innan rötning.....	24
6.2 Rötning .....	25
6.2.1 Rötningsexperiment 1 .....	25
6.2.2 Rötningsexperiment 2 .....	27

6.3 Metangasutbyte, per kg substrat och per år .....	27
6.4 Sammansättning och innehåll efter rötning samt metaller i rötresten .....	28
6.5 Nationell och internationell biogaspotential .....	29
6.6 Känslighetsanalys .....	30
6.7 Osäkerheter och vidare studier .....	30
7 Slutsatser .....	30
8 Referenser.....	32



# 1 Inledning

Världen är i dagsläget starkt beroende av fossila bränslen som råolja och naturgas. Fossila resurser är rester av döda växter och djur som bildats i jordskorpan under hundratals miljoner år och är därför inte en förnybar resurs, utan dess lager töms mycket snabbare än det bildas. Användningen av fossila bränslen leder även till en ökad global uppvärmning eftersom kolet släpps ut i atmosfären, i form av koldioxid, snabbare än det förs tillbaka i marken och resulterar i ett överskott av kol i atmosfären. Koldioxid är en växthusgas som bidrar till den globala uppvärmningen.

Ett annat stort miljöproblem i dagens samhälle är den ständigt ökande produktionen av organiskt avfall. I många länder har hållbar avfallshantering såväl som minskning av avfall blivit stora politiska prioriteringar, vilket är en viktig åtgärd för att minska föroreningar och utsläpp av växthusgaser och för att minska globala klimatförändringar (Seadi et al. 2008).

En av lösningarna på båda dessa miljöproblem är biogas. Biogas produceras genom anaerob rötning av organiskt material, som matavfall, avloppsslam och jordbruksrester. Biogas kan användas till el- eller värmeproduktion eller uppgraderas och användas som fordonsbränsle eller induceras i industrin (Svensk biogas u.å).

Till skillnad från fossila bränslen är biogas förnybar, eftersom den produceras från biomassa. I Sverige produceras även biogas främst av organiskt avfall som i de flesta fall inte har något annat användningsområde. Vid förbränning av biogas, som vid förbränning av fossila bränslen, frigörs koldioxid. Den största skillnaden jämfört med fossila bränslen är att kolet i biogas nyligen togs upp från atmosfären genom växternas fotosyntes. Biogasens kolkretslopp stängs alltså inom en mycket kort tid, jämfört med fossila bränslen. Biogasproduktion minskar även utsläppen av metan och dikväveoxid från lagring och utnyttjande av obehandlad djurgödsel. Desto mer energi- och transportsektorn ersätter fossila bränslen med biogas, desto större minskningar i utsläppen av koldioxid, metan och lustgas kommer att ske vilket bidrar till att minska den globala uppvärmningen.

Biogas kan produceras i större anläggningar där företag får eller köper in substrat för att röta det och sälja vidare biogasen. Biogas kan även produceras i mindre gårdsanläggningar på bondgårdar eller i större gårdsanläggningar där flera lantbrukare samverkar. På gårdsanläggningar rötas ofta de substrat som finns tillgängliga och gasen används vanligtvis för egen el- eller värmeproduktion (Seadi et al. 2008). 2021 producerades 78 Gwh biogas från mindre gårdsanläggningar i Sverige (Energigas Sverige 2023) men forskare anser att biogaspotentialen från enbart lantbruket (gödsel och växtrester) är 8 – 10 TWh (Christensson et al. 2009).

Europa är, år 2018, den största producenten av biogas, där Tyskland har två tredjedelar av Europas biogaskapacitet. Andra länder som Danmark, Frankrike, Italien och Nederländerna har aktivt främjat biogasproduktion. Efter Europa är det Kina som har högst biogasproduktion där småskaliga biogasanläggningar för hushållsbruk är vanligast. Den tredje största producenten av biogas är USA där uppsamling av deponigas är vanligast (Iea u.å).

Lillerudsgymnasiet är en naturbruksskola med cirka 250 elever. Skolan har grisar, kor, hästar och olika smådjur som producerar gödsel. Det finns även matavfall och resterprodukter från grödor (Jakobsson Åhs 2022). Skolan är intresserad av att bygga en gårdsanläggning för biogasproduktion där de kan röta gödsel, matavfall och rester från grödor för att producera el eller värme för egen användning.

## 2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att ta reda på biogaspotentialen vid samrötning av olika substrat som finns tillgängliga vid lantbruk. Målet är att undersöka olika scenarier för att kunna ge en rekommendation över hur Lillerudsgymnasiet bör samröta sitt substrat för att optimera sitt biogasutbyte. Det ska även undersökas hur studiens resultat är användbart för andra liknande lantbruk i Sverige och globalt.

Målet uppnås genom att svara på följande frågeställningar:

- Vilka parametrar kan påverka biogasutbytet vid rötning av Lillerudsgymnasiets substrat?
- Vilket substratförhållande ger ett maximalt biogasutbyte per kilo substrat för Lillerudsgymnasiet?
- Vilket substratförhållande ger en maximal biogasmängd per år för Lillerudsgymnasiet?
- Vilken potential finns i Sverige att kunna röta substrat från lantbruket, likt Lillerudsgymnasiet? För att få en global utblick undersöks även detta i Kina.

Det är viktigt att skilja mellan biogasutbyte per kilo substrat och biogasmängd per år. Biogasutbytet per kilo substrat kan vara högt för en viss substratblandning men om det inte finns gott om substrat som kan skapa det förhållandet kommer inte den totala mängden biogas per år bli stor. Följden blir då att en stor del av det tillgängliga substratet inte kan användas och biogasmängden blir mindre än vad den hade kunnat vara.

## 3 Bakgrund

### 3.1 Lillerudsgymnasiet

Lillerudsgymnasiet är en naturbruksskola som tillhör Karlstad kommun. Det är en friskola som etablerades år 1892 där eleverna bland annat kan studera naturvetenskap, djurvård, hästhållning eller lantbruk. Skolan har, när detta examensarbete utförs, cirka 250 elever varav 75% bor på skolområdet. På Lillerud finns hästar, grisar, kor, får, fåglar och diverse smådjur. Skolan har även 460 hektar mark där de odlar vall, havre, korn, rybs, vete, raps och ärtor och nämnda grödor genererar även en viss mängd rester som är möjliga för rötning. Dock utfördes detta examensarbete under vinterhalvåret vilket har begränsat mängden tillgängliga grödor på skolan. De grödor som funnits tillgängliga och då även har ingått i studien är ensilage som innehåller klöver och timotej samt spannmålsrester som innehåller havre, korn, vete, ogräs och halm med mera (Jakobsson Åhs 2022).

I samråd med Lillerudsskolan har det valts att fokusera på de gödsel som finns tillgängligt i större mängder. Därför har gödsel från ko, häst och gris inkluderats i studien medan gödsel från får, fåglar och diverse smådjur valts att exkluderas från studien. Elever och personal på skolan gör att det kontinuerligt bildas matavfall, vilket även har ingått som ett substrat i studien. Tabell 1 visar vilka mängder som bildas av respektive substrat på skolan under en vecka samt hur stor andel, i procent, det är av skolans sammanlagda mängd substrat i nuläget. Tabell 2 visar också mängd och andel av respektive substrat men i ett möjligt framtidsscenario där hästarnas strömaterial har bytts ut från spån till halm och det genereras största möjliga mängd hästgödsel. Strömaterial är det material som används som golvunderlag för lantbruksdjur och som häst- och grigödseln därför blir blandad med. Avrens är bortrensat material och

på Lillerudsgymnasiet, samt i detta examensarbete, är det bortrensat material från spannmål (Jakobsson Åhs 2022).

Tabell 1. Mängd och andel av respektive substrat i nuläget.

Substrat	Mängd [kg/vecka]	Andel [%]
Kogödsel	57 692	87,9
Hästgödsel (spån)	5 896	8,99
Grisgödsel	1 539	2,35
Hästgödsel (halm)	238	0,36
Ensilage	96	0,15
Avrens	67	0,10
Matavfall	38	0,06
<i>Total</i>	<i>65 566</i>	<i>100</i>

Tabell 2. Mängd och andel av respektive substrat då spån har ersatts med halm och Lillerud har maximalt antal hästar.

Substrat	Mängd [kg/vecka]	Andel [%]
Kogödsel	57 692	83,9
Hästgödsel (halm)	9336	13,6
Grisgödsel	1539	2,24
Ensilage	96	0,14
Avrens	67	0,10
Matavfall	38	0,05
Hästgödsel (spån)	0	0,00
<i>Total</i>	<i>68 767</i>	<i>100</i>

## 3.2 Biogasprocess

Anaerob rötning är en mikrobiologisk process där nedbrytning av organiskt material sker i frånvaro av syre. Produkterna i denna process är biogas och rötrest. Biogas är en brännbar gas som främst består av metan och koldioxid. Rötrest är en restprodukt och består av det nedbrutna substratet från vilken biogasen har utvunnits (Svensson 2017).

Biogasprocessen kan ske vid olika temperaturer och uppehållstider. Termofil rötning sker vid en temperatur på 50°C - 60°C och en uppehållstid på minst 12 dygn, mesofil rötning sker vid 25°C – 40°C och har en rekommenderad uppehållstid på minst 15 dygn och psykofil rötning sker vid en temperatur under 25°C och kräver en längre uppehållstid än termofil och mesofil rötning (Jarvis & Schnürer 2009).

Psykofil rötning är inte en process som sker i kommersiella biogasanläggningar i nuläget eftersom den går för långsamt. Det är i stället den mesofila processen som är vanligast eftersom den sker under en rimlig tid och är mer stabil och mindre energikrävande jämfört med den termofila processen (Biogödsel u.å).

När en ny rötningsprocess startar behövs ymp. Ymp är vanligtvis rötat substrat från en verksam biogasprocess som innehåller aktiva mikroorganismer. Ympen behövs för att en tillräckligt stor mängd mikroorganismer ska vara närvarande från början i en ny rötningsprocess. Ympen behöver inte vara rötat substrat utan kan även vara andra material som innehåller rätt mikroorganismer, som exempelvis kogödsel (Seadi et al. 2008).

### 3.2.1 Hygienisering

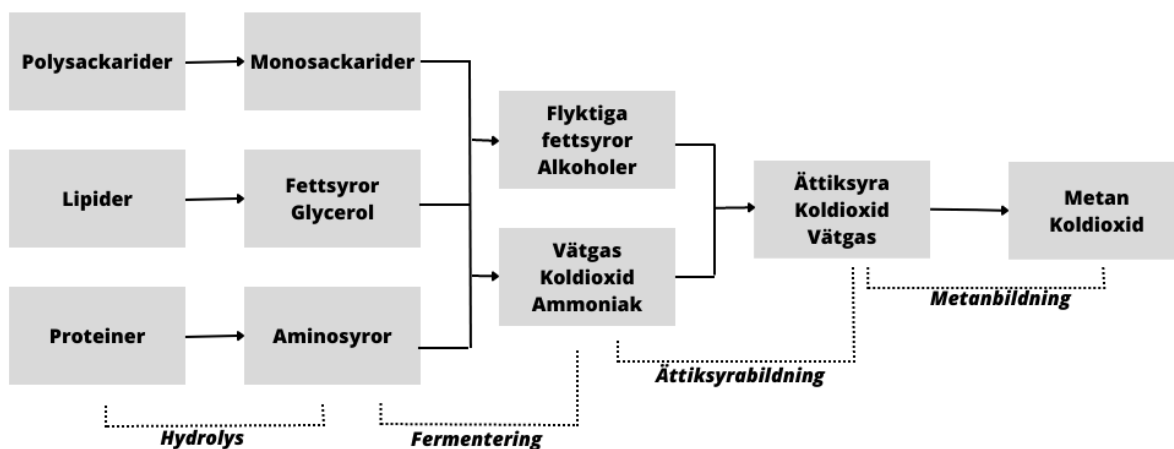
Innan rötning av animaliska biprodukter krävs ofta en hygienisering. Hygienisering är en process där patogener i substrat dödas eller inaktiveras och finns till för att förhindra smitta till människor och djur. Processen utförs genom att substrat värms till 70°C och håller den temperaturen under minst 1 timme.

Animaliska biprodukter delas in i tre olika kategorier beroende på vilken risk substratet antas bidra med. Kategori 3 utgör den lägsta risken och får alltid rötas, dock ofta med krav om hygienisering. Kategori 1 utgör den högsta risken och får enbart rötas under speciella omständigheter men sådant material rötas inte i Sverige i nuläget.

Gödsel behöver inte hygieniseras om rötningen sker vid en gårdsanläggning och gödseln kommer från den egna gården och eventuellt från några få andra gårdar. Rötresterna ska då benämnas som obehandlade och får spridas om berörd myndighet inte anser att det bidrar till någon smittorisk. Om biogasanläggningen rötar gödsel från ett flertal andra gårdar behövs dock hygienisering ske. Matavfall behöver enligt standarden alltid hygieniseras (Jordbruksverket 2016a).

### 3.2.2 Röttningsprocess

Röttningsprocessen kan delas in i fyra steg där specifika grupper av mikroorganismer är involverade i varje enskilt steg. Dessa organismer bryter successivt ned produkterna från de föregående stegen. Figur 1 visar en förenklad bild över biogasprocessens fyra olika steg: hydrolys, fermentering, ättiksyrabildning och metanbildning (Seadi et al. 2008).



Figur 1. De olika stegen i röttningsprocessen. Illustrerat utifrån (Seadi et al. 2008).

Processtegen som visas i figur 1 löper parallellt i tid och rum, i röt-kammaren. Hastigheten på den totala nedbrytningsprocessen bestäms av kedjans långsammaste reaktion. För biogasanläggningar, som bearbetar vegetabiliska substrat som innehåller cellulosa, hemicellulosa och lignin, är hydrolys den hastighetsbestämmande processen. Biogasproduktionen når sin topp under metanbildningen.

Hydrolys är det första steget under röttningsprocessen där komplexa organiska material sönderdelas till mindre enheter. Hydrolytiska mikroorganismer utsöndrar hydrolytiska enzymer och omvandlar biopolymerer till enklare och lösliga föreningar som monosackarider, fettsyror, glycerol och aminosyror.

Nästa steg i processen är fermenteringen där produkterna från hydrolysen bryts ner ytterligare. Fermentativa bakterier omvandlar enkla sockerarter, fettsyror och aminosyror till acetat, koldioxid och vätgas samt alkoholer och flyktiga fettsyror (VFA).

Tredje steget i rötningsprocessen är ättiksyrabildningen där produkter från fermenteringen, som inte direkt kan omvandlas till metangas i sista steget (metanbildning), omvandlas till metanogena substrat. VFA och alkoholer oxideras till metanogena substrat som acetat, väte och koldioxid. VFA, med kolkedjor längre än två enheter, och alkoholer, med kolkedjor längre än en enhet, oxideras till acetat och väte. Ättiksyrabildningen och metanbildningen sker vanligtvis parallellt.

Det fjärde och sista steget är metanbildningen där metanogena bakterier bildar metangas, koldioxid och vatten. 70 % av den bildade metanen kommer från acetat, resterande 30% framställs från omvandlingen av väte och koldioxid. Acetat omvandlas till metan och koldioxid medan väte och koldioxid omvandlas till metan och vatten (Seadi et al. 2008).

### 3.2.3 Rötrest

Efter att rötningen har skett och biogas har utvunnits återstår en del av substratet, denna massa kallas för rötrest. Rötresten innehåller svårnedbrytbart organiskt material, oorganiskt inert material, mikroorganismer och cirka 95% vatten (Svensson 2017). Den är även rik på växtnäring som kväve, fosfor, kalium och mikronäringsämnen och är därför lämplig att applicera på mark som biogödsel. Jämfört med rå djurgödsel har rötresterna förbättrat gödseffektiviteten på grund av högre homogenitet och näringstillgänglighet, bättre C/N-förhållande och minskad lukt (Avfall Sverige et al. 2013).

De parametrar som behöver undersökas i rötresten, om den ska användas som biogödsel, är innehåll av tungmetaller och patogener. Mängden tungmetaller i biogödseln varierar beroende på vad som rötas. Andelen kadmium är högre i biogödsel där substratet varit rikt på rotfrukter. Zink och koppar är ofta de metaller som begränsar mängden biogödsel som får appliceras på jordbruksmark. Mängden patogener minskas vid mesofil rötning men har inte samma effekt som hygienisering av rötresten.

Medelvärdet 2009 för mängden fosfor i rötresterna från 10 samrötningsanläggningar är 500 mg/l. Anläggningarna har då rotat 24% gödsel, 30% slakteriavfall, 13% hushållsavfall, 15 % livsmedelindustriavfall och 18 % övrigt. När mängden hushållsavfall ökar och mängden gödsel minskar ligger fosforhalten i rötresten istället på 300 mg/l (Avfall Sverige et al. 2013).

Biogasanläggningar kan i Sverige certifiera sin biogödsel enligt SPCR 120, där krav ställs på synliga föroreningar, organisk substans, växtdelar, metaller och smittskydd (Granström 2014). Avfall Sverige äger certifieringssystemet och RISE utför den (Avfall Sverige 2023).

Maximal mängd metaller som biogödseln får innehålla för SPCR 120-certifiering visas i tabell 3.

Tabell 3. Gränsvärden för metaller i biogödseln.

Metall	Maximal halt, mg/kg TS
Bly	100
Kadmium	1
Koppar	600
Krom	100
Kvicksilver	1
Nickel	50
Zink	800

Värdena är hämtade från Avfall Sverige (2023).

### **3.2.4 Parametrar som påverkar substratens biogaspotential**

Det finns flera olika parametrar på substratet som påverkar dess potential att omvandlas till biogas. Dessa är pH, kol/kväve-kvot (C/N-kvot), mängden flyktiga fettsyror (VFA), mängden ammonium, mängden torrs substans (TS) och mängden glödförlust (VS).

Substratets pH-värde påverkar tillväxten av metanogena mikroorganismer. Det optimala intervallet för pH under mesofil rötning är mellan 6,5 och 8,0. Processen hämmas stort om pH sjunker under 6,0 eller stiger över 8,3. Värdet på pH ökas av ammoniak och minskas vid ackumulering av VFA (Seadi et al. 2008).

C/N-kvoten står för mängden kol delat med mängden kväve och bör vara cirka 20 för ett optimalt substrat. Kolet i substratet utgör en energikälla till mikroorganismerna och kvävet påverkar i vilken hastighet mikroorganismerna växer. Vid en hög C/N-kvot, alltså med ett överskott av kol, hämmas mikroorganismernas tillväxt vilket resulterar i att röttningsprocessen går långsammare. Vid en låg C/N-kvot, alltså ett överskott av kväve, kan det bildas ackumuleringar av ammonium som kan vara giftigt för mikroorganismerna. För att dessa effekter inte ska ske behöver C/N-kvoten i ett substrat vara högre än 15 men lägre än 30 (Carlsson & Uldal 2009).

VFA (flyktiga fettsyror) bildas och konsumeras under röttningsprocessen och är exempelvis acetat, laktat med mera. VFA är en förening med en kolkedja på upp till 6 atomer och dess koncentration påverkar röttningsprocessens stabilitet. En för hög koncentration VFA kan bidra till att pH-värdet minskar. Den rekommenderade koncentrationen VFA är olika beroende på röttningsprocessen (Seadi et al. 2008) men den rekommenderade halten VFA ska vara under 20 g/L (Jiang et al. 2018).

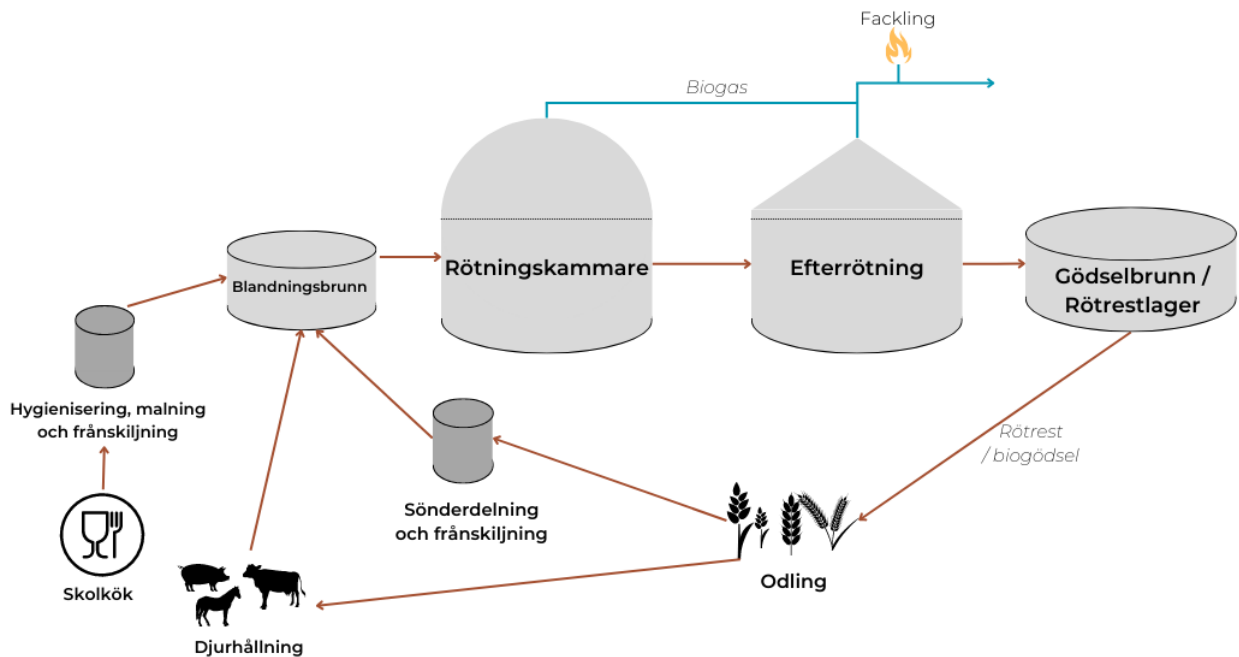
Under röttningsprocessen omvandlas en del av kvävet till ammonium och ammoniak, som är i jämvikt med varandra. Temperatur och pH styr jämvikten där högre temperatur och pH ger högre andel ammoniak. Vissa substrat innehåller dock ammonium innan rötning. Ammoniumet bildar i processen ammoniumbikarbonat som ger en ökad resistent och buffertkapacitet mot organisk överbelastning i processen. Vid höga koncentrationer är dock ammoniumkväve toxiskt för mikroorganismerna men det är svårt att säga hur toxiskt, då detta avgörs av temperatur och pH. 2 – 3 g/l är vanligtvis en koncentration som inhiberar mikroorganismerna (Carlsson & Uldal 2009).

TS (torrs substans) beskriver mängden av ett ämne när det är 100% torrt. Substrat i en kommersiell röttningsprocess ska ha tillräckligt låg TS för att kunna pumpas, med mera, men tillräckligt hög TS för att ha bra mekaniska egenskaper. En lämplig TS-halt i en storskalig biogasanläggning är cirka 10% där undantaget är fetrika substrat som kan ha hög TS-halt men ändå vara möjliga att pumpa.

VS (glödförlust) är andelen av TS som förbränns vid 550 °C och kan användas som ett mått på ett ämnes organiska innehåll. Det är den organiska andelen i ett substrat som kan omvandlas till biogas. Dock finns det vissa ämnen, som lignin och plast, som räknas som VS men som inte kan omvandlas till biogas (Carlsson & Uldal 2009).

### **3.3 Gårdsbiogasanläggning**

En gårdsbiogasanläggning kan var utformad på flera olika sätt. Figur 2 visar en förenklad bild över hur biogasprocessen vid Lillerudsgymnasiet skulle kunna se ut. De substrat som används är då matavfall från skolköket, gödsel från skolans djur samt växtrester från odlingar.



Figur 2. Illustration av hur biogasprocessen kan vara uppbyggd vid Lillerudsgymnasiet, bilden är skapad efter (Christensson et al. 2009).

Matavfall behöver genomgå malning och hygienisering innan det kan rötas och växtresterna behöver sönderdelas. Djurgödseln behöver inte genomgå någon förbehandling, med undantag för om gödseln är blandad med strömateriale som behöver sönderdelas innan rötning, som exempelvis halm. Matavfallet och växtresterna bör även genomgå någon form av frånskiljning innan rötningen för att säkerställa att önskat material inte följer med in till rötningskammaren.

Efter förbehandlingarna pumpas substraten vidare till en blandningsbrunn som fungerar både till lagring och blandning av substraten. Lagring kan vara fördelaktigt ifall det av någon anledning skulle bli en ojämn tillgång på de olika substraten.

Substraten pumpas sedan vidare till röt-kammaren, som är huvuddelen i biogasprocessen. I röt-kammaren bryts det organiska materialet ner under syrefria förhållanden och biogas bildas under kontinuerlig omrörning. Rötresterna pumpas därefter vidare till en tank för efterrötning där den sista biogasen utvinns. Efterrötningsteget finns för att utvinna så mycket biogas som möjligt från substraten och minska metanutsläppen från rötresterna till omgivningen.

Den producerade biogasen tas tillvara från röt-kammaren och efterrötningen och kan användas för att producera värme och/eller el eller uppgraderas och användas som fordonsbränsle. Eftersom metangas är en stark växthusgas behöver en fackla finnas i systemet för att kunna bränna gasen, från metangas till koldioxid, vid den händelse att den inte kan tas tillvara. Detta för att förhindra utsläpp av metangas till atmosfären.

Rötresterna pumpas vidare från efterrötningen till ett rötrestlager, här kan med fördel den redan befintliga gödselbrunnen användas. Slutligen kan rötresten användas som biogödsel ute på odlingsmark (Christensson et al. 2009).

### 3.4 Tidigare studier

Mycket forskning har gjorts på biogasutbyten från olika substrat. Det är inte möjligt att hitta tidigare studier som undersöker biogaspotentialen från exakt samma substratblandningar och substratförhållanden som undersöktes i detta examensarbete. Det finns dock tidigare studier som har rötat substrat som också undersökts i detta examensarbete.

Kogödsel är det substrat det finns mest av på Lillerudsskolan, se tabell 1. Demichelis et al. (2022) rötar kogödsel i mesofila satsvisa experiment. Rötningen sker i en temperatur på 37 °C och efter 20 dagar har det bildats cirka 275 Nml biogas/g VS, vilket är cirka 193 Nml metangas/g VS.

Hästgödsel är det substrat som finns i näst störst mängd på Lillerudsgymnasiet, se tabell 1. Czubaszek et al. (2022) rötar hästgödsel under mesofila förhållanden (38 °C). Efter 20 dagar har det bildats cirka 336 Nml biogas/g VS. Det framgår inte vilket strömateriale hästgödseln är blandad med. Wriland et al. (2023) rötar också hästgödsel men det resulterar enbart i ett biogasutbyte på 185 Nml/g VS. Rötningen sker i 37,5 °C och resultatet registrerades efter 20 dagar. När hästgödseln rötades togs det med så lite strömateriale som möjligt men det framkommer inte vilket strömateriale som hästarna använder (Weiland et al. 2023).

Böske et al. (2015) rötar hästgödsel kombinerat med olika strömateriale. Rötningen sker under termofila förhållanden (55°C) och de strömateriale som undersöktes var granspån, hampa-, lin- och vete. Resultatet visar att hästgödseln som var blandad med vete hade högst biogasutbyte medan hästgödseln som var blandad med granspån hade lägst biogasutbyte. Wartell (2012) undersöker också hur sågspån från barrträd påverkar biogasutbytet vid rötning av hästgödsel. Rötningen sker mesofilt vid 35 °C. Resultatet visade att sågspånet knappt var nedbrytbart men inte påverkade metangasproduktionen från hästgödseln.

Tian et al (2023) rötar grigödsel i mesofila förhållanden med en temperatur på 37 °C. Efter 20 dagar har det bildats 160 ml metan/g VS. Det framkommer inte vilket strömateriale som gödseln är blandad med.

Tidigare studier som rötat matavfall har resulterat i ett biogasutbyte på 495 ml/g VS. Rötningen skedde då mesofilt under 21 dagar (Deena et al. 2022).

Himanshu et al. (2018) undersöker metanpotentialen för ensilage producerat från klöver. Ensilaget rötas satsvis i 38 °C och efter 20 dagar har det bildats cirka 230 ml metangas/g VS. Innan rötningen torkades och maldes ensilaget.

Det substrat som i detta examensarbete benämns som avrens består av foderrester som har rensats bort från Lillerudsgymnasiets spannmål. Spannmålet är bland annat havre och vete. Rajput et al. (2021) undersökte biogaspotentialen för vete och resultatet visar ett utbyte på 60 ml biogas/g VS efter 20 dagars rötning. Rötningen skedde då mesofilt och vete genomgick inte någon förbehandling. Kusch et al. (2011) undersöker metanpotentialen för havre och resultatet visar ett utbyte på 160 ml metangas/g VS efter 20 dagars rötning. Rötningen skedde mesofilt med en temperatur på 37 °C och havren förbehandlades genom att malas till en partikelstorlek på under 1 mm.

Det har inte hittats några svenska tidigare studier som undersöker biogasutbytet vid samrötning av de substrat som ingår i detta examensarbete.



## 4 Metod

### 4.1 Substrat och ymp

Alla substrat hämtades från Lillerudsgymnasiet. Ympen som användes vid rötningsförsöken hämtades från Biogasbolaget i Karlskoga. Ympen bestod av slam som kommer direkt från röt-kammaren. Biogasbolaget i Karlskoga producerar biogas som till största del kommer från matavfall men även från gödsel, slaktrester, fiskrens, glycerol och ensilage. Ymp från biogasbolaget hämtades 12 dagar innan det första rötningsförsöket startade och placerades i rumstemperatur. 7 dagar innan rötningen startade ställdes ympen i värmeskåp med en temperatur på 37 °C. Detta gjordes för att så mycket som möjligt av det organiska materialet i ympen skulle brytas ner och inte bidra med biogasproduktion vid rötningsförsöken. Vid det andra rötningsförsöket hämtades ympen från Karlskoga samma dag som rötningen startade, vilket gjorde att den inte hann vara i värmeskåp innan den användes.

Substraten hämtades 6 dagar innan det första rötningsförsöket startade och 5 dagar innan det andra rötningsförsöket startade. Substraten stod under de 5–6 dagarna i kylskåp för att det organiska materialet skulle brytas ner så lite som möjligt. Kogödseln bestod av kogödsel, foderrester och spånrester. Hästgödseln var antingen blandad med halm eller kutterspån, spånet var då mestadels producerat från barrträd. Grisgödseln var blandad med halm. Matavfallet var taget från en slumpmässig skollunch och bestod under första rötningsförsöket bland annat av ris, potatis, kyckling och tomat. Under andra rötningsförsöket bestod matavfallet bland annat av potatis, bröd, kaffesump och tomat. Substratet som benämns ensilage bestod av ensilage som blivit oanvändbart för djuren och var producerat från, till största del, klöver och timotej. Avrens var material som var bortrensat från spannmål och består av bland annat rester från havre, vete, korn, ogräs och halm. Substraten hämtades i början av februari för första rötningsförsöket och i slutet på mars för andra rötningsförsöket. Substraten togs så färska som möjligt med undantag för ensilage som kan ha varit på skolan i upp till 2 år.

I figur 3 syns de olika substrat som användes under rötningsexperimenten. Från vänster visas först avrens, sedan ensilage, hästgödsel med halm, hästgödsel med spån, grisgödsel med spån, matavfall och slutligen kogödsel.



Figur 3. Fotografi av de olika substrat som användes vid rötningsexperimenten.

Tabell 4 visar värden på C/N-halten och pH-värdena för respektive substrat hämtat från litteratur. Det hade även varit av intresse att ta fram litteraturvärden över mängden kol, VFA, och ammonium i de olika substraten men detta fanns inte i tidigare litteratur för de flesta substraten.

Tabell 4. Litteraturvärden för C/N-halt och pH-värden för substraten.

	C/N	pH
Kogödsel	8,30 <sup>1</sup>	7,0 <sup>1</sup>
Hästgödsel (spån)	29,6 <sup>2</sup>	7,5 <sup>3</sup>
Hästgödsel (halm)	27,4 <sup>2</sup>	7,5 <sup>3</sup>
Grisgödsel	11,0 <sup>4</sup>	8,1 <sup>4</sup>
Matavfall	22,8 <sup>5</sup>	6,4 <sup>5</sup>
Ensilage	21,0 <sup>6</sup>	4,0 <sup>7</sup>
Avrens	56,5 <sup>8, 9, 10</sup>	5,8 <sup>9, 10, 11</sup>

<sup>1</sup>(Kovačić et al. 2019), <sup>2</sup>(Mönch-Tegeder et al. 2013), <sup>3</sup>(Van Vlierberghe et al. 2022),

<sup>4</sup>(Rivera-Hernández et al. 2022), <sup>5</sup>(Abbas et al. 2022), <sup>6</sup>(Czubaszek et al. 2022),

<sup>7</sup>((Nationalencyklopedin u.å), <sup>8</sup>(Zhao et al. 2018), <sup>9</sup>(Rajput et al. 2021), <sup>10</sup>(Feng et al. 2019),

<sup>11</sup>((Van Vlierberghe et al. 2021)

## 4.2 Provtagning och beräkning innan rötning

TS (torrsubstans) och VS (glödförlust) mättes för alla substrat och för ympen. TS mättes genom att först väga materialet, sedan torka det i 103 °C i en till tre dagar och slutligen väga det torra materialet. TS, i procent, kan sedan beräknas i (1), där  $TS_g$  är materialets torra vikt och  $S_g$  är substratets vikt innan det torkas.

$$TS_{\%} = \frac{TS_g}{S_g} * 100 \quad (1)$$

VS mättes genom att först bränna det torkade materialet i en muffelugn på 550 °C. En muffelugn är ugn där material kan brännas i höga temperaturer isolerat från förbränningsmaterialet. Materialet bränns under så lång tid att allt organiskt material ska vara förbränt, vilket var cirka 30 minuter. För att säkerställa att alla organiska ämnen var förbrända vägdes materialet flera gånger och stoppades tillbaka i ugnen mellan vägningarna tills vikten stabiliserades. Det material som var kvar efter förbränningen kallas askrester. Mängden organiskt material ( $VS_g$ ) beräknades i (2), där  $Ask_g$  är mängden askrester. Andelen organiskt material av substratet beräknades i (3) och andelen organiskt material av torrsubstansen beräknades i (4).

$$VS_g = TS_g - Ask_g \quad (2)$$

$$VS_{\%tot} = \frac{VS_g}{S_g} * 100 \quad (3)$$

$$VS_{\%TS} = \frac{VS_g}{TS_g} * 100 \quad (4)$$

TS och VS beräknades två gånger för alla substrat och för ympen och sedan togs ett medelvärde. Materialen vägdes med två decimalers noggrannhet. Under andra rötningsexperimentet mättes VS för ympen först efter att rötningen hade startat och därför antogs det att VS var samma för ympen under första och andra rötningsexperimentet.

Av substraten var det enbart i kogödseln som pH, TOC, VFA och ammonium kunde mätas eftersom dessa mätningar krävde att materialet var flytande. Nämnade parametrar mättes även i substratblandningar som var blandade liksom de olika fall som skulle rötas.

pH-värdena mättes tre gånger för kogödseln och för substratblandningarna och sedan togs ett medelvärde. pH mättes med en pH-meter (Hach HQ30d). Innan ammonium, TOC och VFA kunde mätas behövde kogödseln och substratblandningarna vakuum-filtreras. Kogödseln behövde även centrifugeras för att kunna vakuum-filtreras. Filtreringen skedde med ett filterpapper med filtergrad MGC. Ammonium mättes med kyvetttest LCK302, TOC mättes med kyvetttest LCK387 och VFA mättes med kyvetttest LCK365.

### 4.3 Rötning

Innan substraten blandades för rötning hygieniserades matavfallet för att efterlikna en verklig storskalig biogasprocess. Som tidigare nämnts är det enbart matavfall, av de substrat som används, som måste hygieniseras. Matavfallet hygieniserades genom att värmas till 70 °C och hålla den temperaturen i minst 60 minuter. Matavfallet mixades till en jämn blandning. Hästgödseln med halm, grisködseln med halm och ensilaget klipptes med en sax till mindre bitar.

Rötningsexperimentet skedde satsvis i en AMPTSII- reaktor. Reaktorn var utrustad med tolv flaskor där ett rötningsexperiment kunde ske i varje flaska. För att få mer pålitliga resultat rötades varje fall i triplikat. Det behövdes även ett fall där enbart ympen rötades för att undersöka hur mycket gas som producerades från enbart ympen och genom det kunna fastställa hur mycket gas som producerades från enbart substratet. Slutsatsen var att det kunde rötas tre olika fall per rötningsexperiment.

Flaskorna hade en total volym på 500 ml där arbetsvolymen utgjorde 400 ml. De var placerade i ett vattenbad som höll en konstant temperatur på 37 °C. I flaskorna fanns även en omrörare som rörde om i 60 sekunder var 60:e sekund för att hålla blandningen jämnt fördelad. Omrörningsmekanismen var seriekopplad mellan flaskorna. Biogasen som producerades leddes till ett kärl som innehöll en NaOH-lösning där koldioxiden fixerades. Vidare leddes den reade metangasen till en enhet där mängden producerad gas mättes och resultaten registrerades i en dator. Datorn registrerade mängden producerad metangas per dag i Nml samt den ackumulerade mängden metangas som producerades i Nml.

Mängden ymp och substrat vid rötningen bestämdes utifrån ett datorprogram tillhörande AMPTSII-reaktorn. Programmet bestämde förhållandet utifrån att mängden VS från ympen skulle vara dubbelt så stor som mängden VS från substratet. Koncentrationen VS i substratet skulle även vara cirka 1 g/400 ml för att inte överbelasta processen. För alla fall så var koncentrationen högre än 1 g VS/400 ml vilket gjorde att blandningarna behövde spädas med vatten. Tabell 5 visar mängd och koncentration VS från substratet och ympen för alla rötningfall. Rötningfallen beskrivs mer under avsnitt 4.3.1 och 4.3.2. Ex. 1 står för rötningsexperiment 1 och ex. 2 står för rötningsexperiment 2.

Tabell 5. Mängd och koncentration VS vid de olika rötningsförsöken från substrat och ymp.

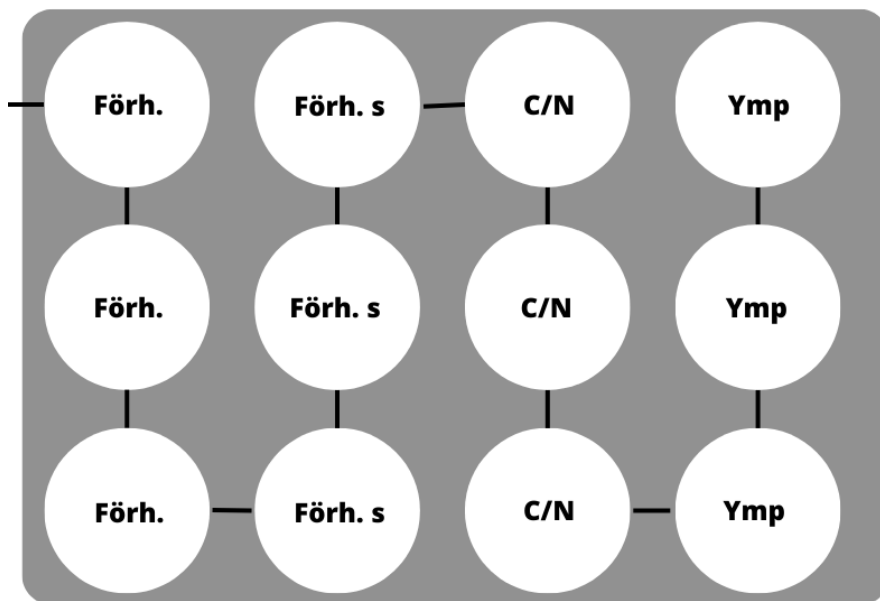
	VS substrat [g]	VS Ymp [g]	VS substrat [% w/w]	VS ymp [% w/w]
S <sub>Förh.</sub>	1,00	2,01	1,88	0,58
S <sub>Förh. s.</sub>	1,00	1,99	1,60	0,59
S <sub>C/N</sub>	1,00	2,00	3,70	0,54
Ymp ex. 1	0,00	2,00	0,00	0,50
S <sub>C/N B</sub>	1,01	2,36*	3,08	0,59
S <sub>C/N -a.j.</sub>	1,01	2,36*	3,08	0,59
S <sub>Förh. HG</sub>	0,99	2,35*	1,94	0,59
Ymp ex. 2	0,00	2,35*	0,00	0,59

\*Under det andra rötningsförsöket blev mängden VS från ympen större än under första rötningsförsöket. Detta beror på att det används en ny sats ymp som har en annan procent VS men på grund av tidsbrist antas ympen fortfarande ha samma procent VS som den ymp som användes vid det första rötningsförsöket. När VS sedan mättes i den nya ympen kunde den egentliga mängden VS från ympen i respektive fall beräknas i efterhand.

Efter att alla behållare hade fyllts med substrat, ymp och vatten placerades de i vattenbadet där de spolades igenom med kvävgas i 60 sekunder för att avlägsna allt syre. Slutligen kunde rötningsprocessen starta. Under rötningen fylldes vattenbadet på cirka varannan dag.

### 4.3.1 Rötningsexperiment 1

Rötningsexperimenten skedde vid två olika tillfällen. Vid det första rötningsexperimentet undersöktes tre olika fall. Figur 4 visar hur flaskorna för de olika fallen placerades i vattenbadet. Strecken mellan flaskorna illustrerar seriekopplingen av omrörningsmekanismen. Seriekopplingen startade i den översta flaskan i S<sub>Förh.</sub>-fallet och slutade i den översta flaskan i ymp-fallet.



Figur 4. Illustration över hur rötningsflaskorna var placerade i vattenbadet under det första rötningsexperimentet.

De tre fall som undersöktes i det första rötningsexperimentet var följande:

S<sub>Förh.</sub> - I det första fallet har allt substrat som Lillerudsgymnasiet har tillgängligt samrötats i samma förhållande som det finns tillgängligt på skolan, alltså utifrån vilken mängd Lillerud har av varje substrat. Detta gjordes för att undersöka biogaspotentialen för skolan då allt deras avfall tas tillvara på och nyttjas. De substrat som rötades var kogödsel, hästgödsel med spån, hästgödsel med halm,

grisgödsel, matavfall, ensilage och avrens. Dock utgjorde matavfall en sådan liten andel av Lillerudsgymnasiets substrat att mängden matavfall i detta fall var noll. Detta fall benämns som "S<sub>Förh.</sub>" vilket står för substratförhållandet som finns på Lillerud.

S<sub>Förh. s.</sub> - I det andra fallet rötades substraten likt S<sub>Förh.</sub>-fallet med undantag för att mängden hästgödsel med spån var noll. Detta gjordes då det fanns en risk att spånet hämmade biogasprocessen eftersom spånet är gjort av barrträd som innehåller lignin och extraktivämen, vars syfte bland annat är att hindra mikroorganismer (Henriksson 2020). Det finns även ett intresse från Lillerudsgymnasiet att i framtiden byta ut hästarnas strömateriell från spån till halm, vilket också bidrog till att det var intressant att undersöka spånets påverkan på rötningsprocessen. Detta fall benämns som "S<sub>Förh. s.</sub>" vilket står för substratförhållandet som finns på Lillerud utan spån.

S<sub>C/N</sub> - I det tredje fallet samrötades de olika substraten i det förhållande som gav ett optimalt C/N-värde. Ett optimalt C/N-värde på substratet antogs ge högst biogasutbyte och detta fall undersöktes för att ta reda på hur mycket substrat som används vid optimalt biogasutbyte. Detta fall benämns "S<sub>C/N</sub>" vilket står för optimalt C/N-värde.

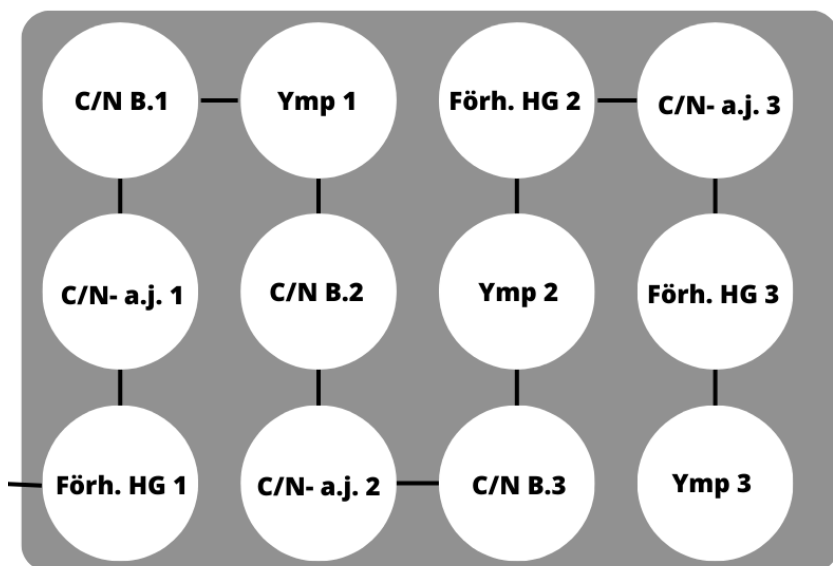
Tabell 6 visar de beräknade C/N- och VS-värdena för alla fall från det första rötningsexperimentet. C/N- värdena är beräknade utifrån tabell 4 och VS-värdena är beräknade utifrån bilaga 3.

Tabell 6. Beräknat C/N- och VS-värde för alla fall från första rötningsexperimentet.

	C/N	VS [%]
S <sub>Förh.</sub>	10,4	11,82
S <sub>Förh. s.</sub>	8,53	11,22
S <sub>C/N</sub>	20,0	25,15

### 4.3.2 Rötningsexperiment 2

Vid det andra rötningsexperimentet undersöktes tre nya fall. I alla tre fall har hästgödsel med spån exkluderats, eftersom det substratet påvisade en negativ effekt på biogasutbytet i det första rötningsexperimentet. Omrörningseffekten visade sig bristfällig under det första rötningsexperimentet. Omrörningen var seriekopplad och de flaskor som var sist i kopplingen fick lite till ingen omrörning vilket resulterade i att slammet skiktade sig och sedimenterade. För att motverka denna effekt kopplades flaskorna om var 3:e till 4:e dag i det andra rötningsexperimentet så att den flaskan som var sist i serien blir först i serien och tvärtom. Vid andra rötningsexperimentet mättes även temperaturen på vattnet som fylldes på i vattenbadet för att säkerhetsställa att vattenbadet höll en konstant temperatur på 37 °C. Det antecknades även vilken dag och tid som vattenbadet fylldes på för att undersöka om det påverkade biogasprocessen. Figur 5 visar hur rötningens flaskor placerades i vattenbadet under det andra rötningsexperimentet, där strecken mellan flaskorna illustrerar seriekopplingen av omrörningsmekanismen. För att ytterligare förhindra att omrörningen skulle påverka resultatet ställdes rötningens flaskor från de olika fallen i blandad ordning så att inte alla flaskor från ett visst fall stod ihop, se figur 5.



Figur 5. Illustration över hur röttningsflaskorna var placerade i vattenbadet under det andra rötningsexperimentet.

De tre fall som undersöktes i det andra rötningsexperimentet var följande:

$S_{C/N B}$  - I det första fallet rötades substratet likt  $S_{C/N}$ -fallet eftersom de tidigare resultaten från det fallet var otydliga. Resultaten visade att  $S_{C/N}$ -fallet både hade det högsta och det lägsta biogasutbytet. Det otydliga resultatet antogs bero på skiktning och sedimentering av slammet. I  $S_{C/N B}$ -fallet är substraten mer blandade än tidigare, eftersom omrörningen kopplas om, och antogs ge ett tydligare resultat där alla flaskor får liknande biogasutbyte. Detta fall kallas ” $S_{C/N B}$ ” vilket står för optimal C/N-halt försök två.

$S_{C/N-a.j.}$  - I det andra fallet samrötades de olika substraten i det förhållande som gav ett optimalt C/N-värde, likt  $S_{C/N}$ -fallet och  $S_{C/N B}$ -fallet. Skillnaden mot föregående fall var att vattnet som substraten blandades ut med var avjoniserat. Kranvatten har ett pH-värde på 8,1 – 8,5 (Karlstad kommun 2022) medan avjoniserat vatten har ett pH-värde på 7 (Purtech u.å). Det avjoniserade vattnet antogs därför bidra med en mindre pH-höjning än kranvatten och på så sätt ge ett mer fördelaktigt pH inför rötningen. Detta fall benämns ” $S_{C/N-a.j.}$ ” vilket står för optimalt C/N-värde med avjoniserat vatten.

$S_{Förh. HG}$  - I det tredje fallet samrötades allt substrat som Lillerudsgymnasiet har tillgängligt i samma förhållande som det finns tillgängligt på skolan. Mängden hästgödsel som finns tillgängligt på skolan varierar under året. I  $S_{Förh.}$ -fallet och  $S_{Förh. s.}$ -fallet utgicks det ifrån den minsta mängden hästgödsel som finns under året för att säkerhetsställa att den mängden hästgödsel alltid finns tillgänglig. I  $S_{Förh. HG}$ -fallet utgås det i stället från den största mängden hästgödsel som finns under året för att undersöka hur röttningsprocessen påverkas när mängden hästgödsel ökar i samröttningsprocessen. Det ska även antas att Lillerud har bytt hästarnas strömaterial från barrträdsspån till halm. Detta fall benämns som ” $S_{Förh. HG}$ ” vilket står för substratförhållandet som finns på Lillerud med extra hästgödsel.

Tabell 7 visar de beräknade C/N- och VS-värdena för alla fall under det andra rötningsexperimentet. C/N-värdena är beräknade utifrån tabell 4 och VS-värdena är beräknade utifrån bilaga 3.

Tabell 7. Beräknat C/N- och VS-värde för alla fall under det andra rötningsexperimentet.

	C/N	VS [%]
$S_{C/N B}$	20,0	20,76
$S_{C/N -a.j.}$	20,0	20,76
$S_{Förh. HG}$	11,0	12,43

### 4.3.3 T-test

Ett t-test utfördes för att undersöka om det fanns en signifikant skillnad i metangasproduktionen mellan de olika fallen som undersöktes. Beräkningen gjordes med hjälp av kommandot "T.TEST" i Microsoft Excel där tvåsidig fördelning och tvåsampeltest med olika varians antogs. T-test gjordes mellan medelvärdena för de olika fallen, till exempel mellan medelvärdet för  $S_{Förh. s.}$ -fallet och medelvärdet för  $S_{Förh. HG.1}$ -fallet. Testet gjordes även mellan flaskorna inom samma fall, till exempel mellan  $S_{Förh. HG.1}$  och  $S_{Förh. HG.2}$ , och mellan flaskorna från olika fall, till exempel mellan  $S_{Förh.2}$  och  $S_{C/N.2}$ . T-testen gjordes enbart över den ackumulerande metangasproduktionen och inte över resultaten för den dagliga metangasproduktionen.

För att inte behöva testa varje fall mot varandra jämfördes först de fall vars resultat hade störst skillnad och sedan olika fall med mindre och mindre resultatskillnad tills t-testets resultat visade att det inte fanns en signifikant skillnad mellan fallen. När t-testet visade att det inte var signifikant skillnad mellan metangasproduktionen från olika fall behövde det inte genomföras t-test på fall som hade en mindre skillnad mellan sig.

### 4.4 Metangasutbyte, per kg substrat och per år

Metangasmängden (per kilogram substrat) beräknades i (5) för varje substrat.  $CH_{4\ L/kg\ VS}$  står för metangasutbytet i liter per kg VS och hämtades från figur 6, där ml/g blir samma värde som l/kg.  $VS_{\%tot}$  är andelen VS i respektive substratblandning och hämtades från tabell 6 och 7.

$$CH_{4\ L/kg\ sub} = CH_{4\ L/kg\ VS} * \frac{VS_{\%tot}}{100} \quad (5)$$

Metangasmängden per år för Lillerudsgymnasiet beräknades i (6) för varje substrat.  $M_{sub}$  står för den totala massan substrat som finns tillgängligt på Lillerudsskolan, per år, för respektive fall och visas i tabell 8. För  $S_{C/N}$ ,  $S_{C/N\ B}$  och  $S_{C/N\ a.j.}$  är det mängden matavfall som begränsar den totala mängden substrat.

$$CH_{4\ m^3/år} = (CH_{4\ L/kg\ sub} * M_{sub})/1000 \quad (6)$$

Tabell 8. Total massa substrat tillgänglig vid Lillerudsskolan för varje fall, per år.

	Massa substrat ( $M_{sub}$ ) [kg/år]
$S_{Förh.}$	3 409 417
$S_{Förh. s.}$	3 102 817
$S_{C/N}$	39 115
$S_{C/N\ B}$	39 115
$S_{C/N\ -a.j.}$	39 115
$S_{Förh. HG}$	3 575 892

### 4.5 Provtagning och beräkning efter rötning

När rötningförsöket var klart återstod rötresterna. Följande mätningar gjordes på rötresterna för alla olika rötningfallen samt fallen med enbart ymp.

pH mättes tre gånger för varje fall, därpå togs ett medelvärde. En del av blandningen torkades för att mäta TS. Efter att blandningen var torkad brändes den i en muffelugn för att mäta och beräkna VS. TS och VS mättes tre gånger för respektive fall och sedan togs ett medelvärde. TS och VS beräknades med hjälp av (1), (2), (3) och (4).

För att mäta mängden ammonium, VFA, TOC och fosfat i rötresterna filtrerades de först i en vakuumfiltrerare med ett filterpapper med grad MGC. VFA mättes med kyvettest LCK365, TOC mättes med kyvettest LCK387, LCK 386 och LCK385, ammonium (NH<sub>4</sub>-N) mättes med kyvettest LCK302 och fosfat (PO<sub>4</sub>-P) mättes med kyvettest LCK049.

En del av rötresterna torkades i glasbägare för att kunna användas vid XRF-mätningar. XRF (röntgenfluorescens) mäter mängden metaller i ett material genom joniserande röntgenstrålning (Scantec Nordic 2013). När rötresterna var torra maldes de i en mortel och hanterades med en sked av keramik, då metallföremål kunde påverka proverna. De malda proverna placerades i små plastbehållare som hade en tunn plastfilm (Prolene Thin-Film) över sig. Sedan mättes mängden av olika ämnen i rötresterna med hjälp av XRF. De ämnen som mättes var bly (Pb), kadmium (Cd), koppar (Cu), krom (Cr), kvicksilver (HG), nickel (Ni) och zink (Zn).

Utröttningsgrad (*URG*) är ett mått på andelen organiskt material (VS) som har brutits ner under röttningsprocessen och beräknades genom (7). Där  $VS_{in}$  är mängden VS i blandningen innan rötning och  $VS_{ut}$  är mängden VS i blandningen efter rötning. Utröttningsgraden beräknades för alla fall.

$$URG = \left(1 - \left(\frac{VS_{ut}}{VS_{in}}\right)\right) * 100 \quad (7)$$

## 4.6 Känslighetsanalys

Då ympen inför det andra rötningsexperimentet hämtades samma dag som rötningen startade fanns det inte tid för att mäta VS på ympen inför rötningsexperimentet. Det antogs i stället att mängden VS var samma i den nya ympen som i den som användes vid det första rötningsexperimentet. VS mättes i efterhand för den nya ympen och det undersöktes om det antagna VS-värdet hade någon påverkan på resultatet med en känslighetsanalys. Känslighetsanalysen gjordes genom att beräkna hur stor skillnad det var mellan mängden ymp och substrat som användes vid rötning för varje fall jämfört med mängden ymp och substrat som hade används med det korrekta VS-värdet.

## 5 Resultat

### 5.1 Sammansättning och innehåll innan rötning

För resultat angående mängd och andel substrat som använts för de olika rötningfallen under det första rötningsexperimentet, se bilaga 1. För resultat angående mängd och andel substrat som används för de olika rötningfallen under det andra rötningsexperimentet, se bilaga 2. Bilaga 1 och 2 visar även den totala mängden substrat, ymp och vatten som används för respektive fall. Bilaga 3 visar andelen TS och VS i respektive substrat innan första och andra rötningsexperimenten.

Tabell 9 visar pH-värdet, mängden kol (TOC), mängden flyktiga fettsyror (VFA) och mängden ammonium (NH<sub>4</sub>-N) i alla fall, innan rötning, samt i kogödseln.

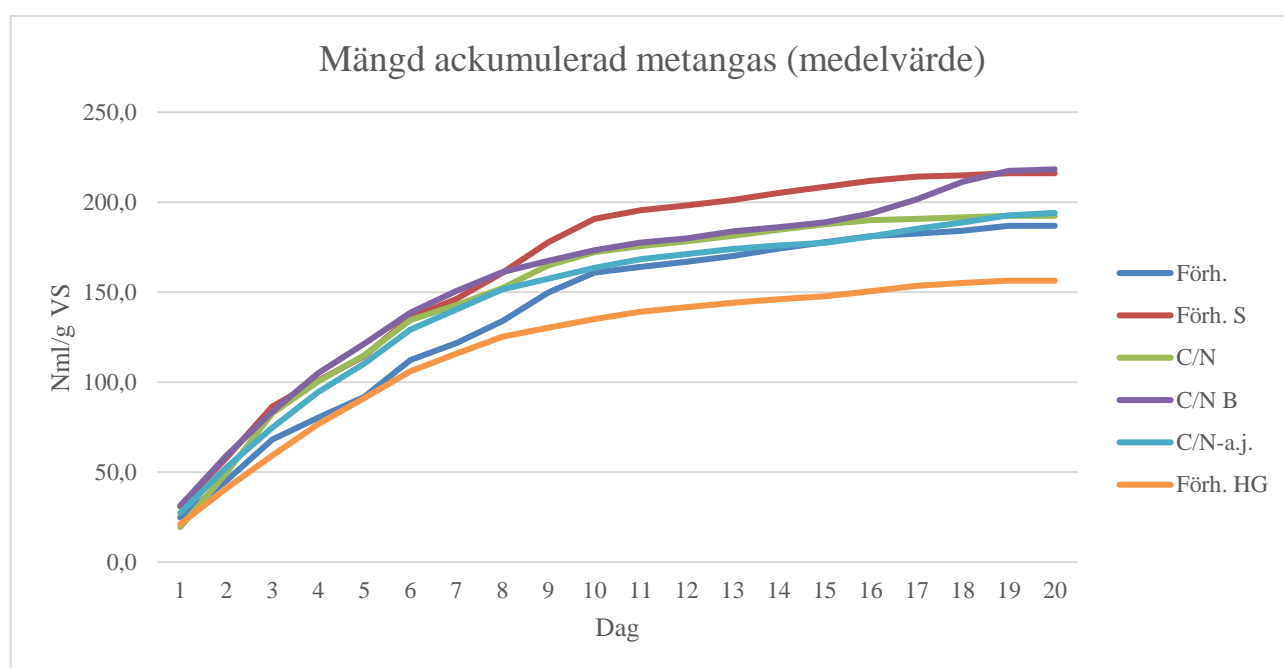


Tabell 9. pH, TOC, VFA och NH<sub>4</sub>-N i kogödsel och alla fall innan rötning.

	pH	TOC mg/L	VFA mg/L	NH <sub>4</sub> -N mg/L
Kogödsel	6,83	7775	9650	48,9
S <sub>Förh.</sub>	7,82	1705	1615	103
S <sub>Förh. s.</sub>	7,60	1286	1450	94,6
S <sub>C/N</sub>	7,98	1321	872,0	65,1
S <sub>C/N B</sub>	7,54	1273	930,5	58,3
S <sub>C/N -a.j.</sub>	7,61	1402	1028	64,3
S <sub>Förh. HG</sub>	7,95	1056	1002	81,0

## 5.2 Rötning

Figur 6 visar den ackumulerande mängden metangas per gram VS som har producerats från alla fall. Varje fall rötas i triplikat och i figur 6 har ett medelvärde tagits över metangasproduktionen för respektive fall. Den metangas som ympen har bidragit med är borträknad för varje fall. Efter 20 dagars rötning har det bildats 187 Nml metangas i S<sub>Förh.</sub>-fallet, 216 Nml metangas i S<sub>Förh. s.</sub>-fallet, 192 Nml metangas i S<sub>C/N</sub>-fallet, 218 Nml metangas i S<sub>C/N B</sub>-fallet, 194 Nml metangas i S<sub>C/N -a.j.</sub>-fallet och 156 Nml metangas i S<sub>Förh. HG</sub>-fallet. Medelvärdet för S<sub>Förh. HG</sub>-fallet togs enbart från flaska 1 och 3 inom det fallet eftersom flaska 2 var märkbart defekt, se figur 9. S<sub>Förh.S</sub> och S<sub>C/N B</sub> resulterade i det högsta metangasutbytet och S<sub>Förh. HG</sub> resulterade i det lägsta metangasutbytet.



Figur 6. Medelvärde över producerad mängd metangas per g VS för alla fall.

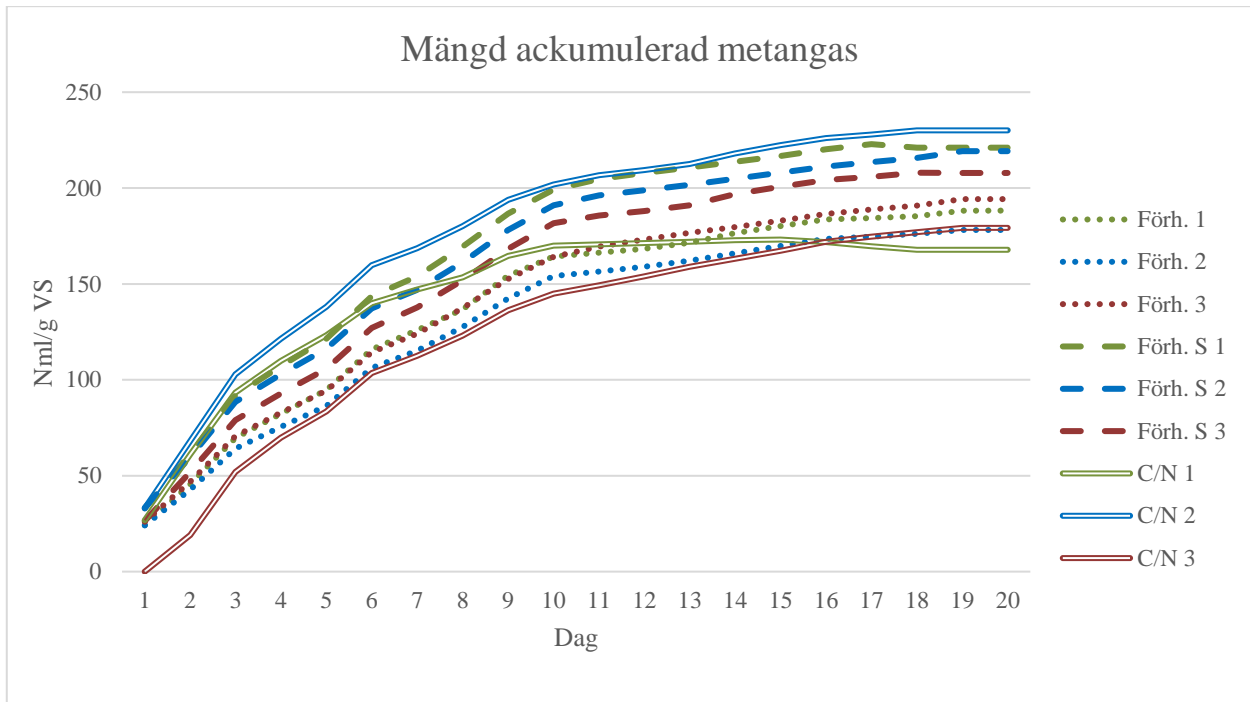
Under det första rötningsexperimentet är medelvärdet för ympens metangasproduktion 44 Nml och under det andra rötningsexperimentet är medelvärdet 95 Nml.

### 5.2.1 Rötningsexperiment 1

Figur 7 visar mängden producerad metangas per gram VS från varje flaska från alla fall under första rötningsexperimentet. Den metangas som ympen producerar är borträknad från de olika fallen så att grafen enbart visar den metangas som har producerats från substratblandningarna. Flaska 3 i S<sub>C/N</sub>-fallet

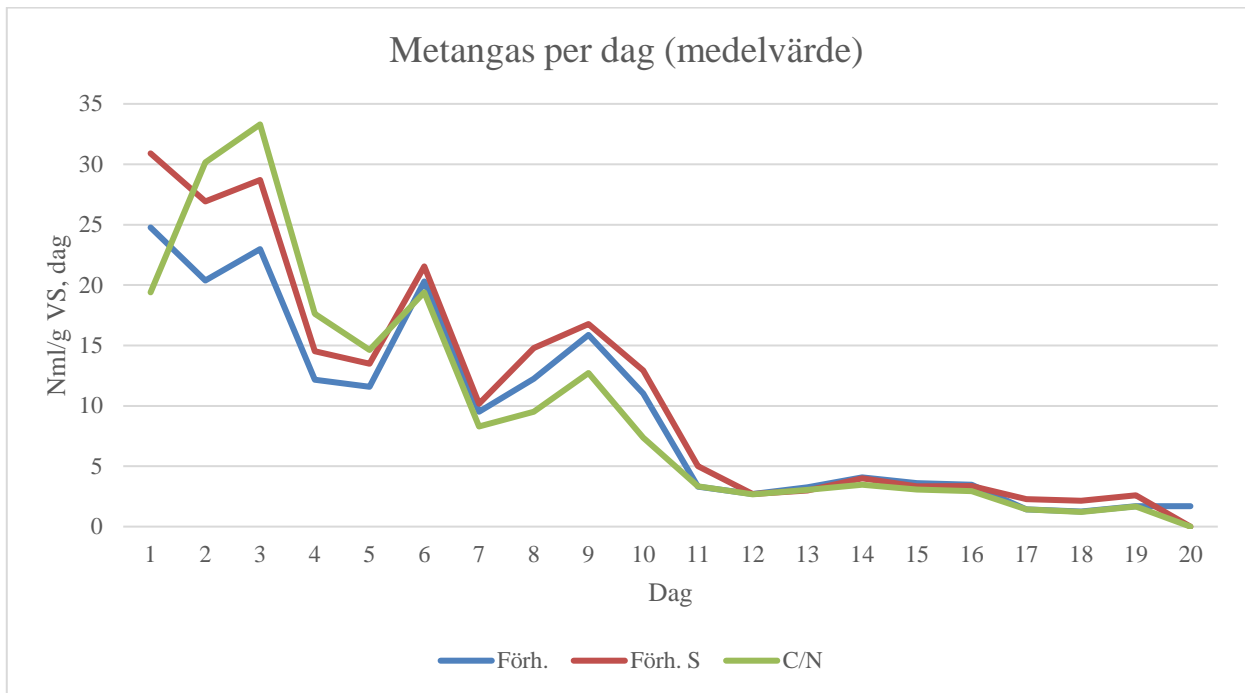
slutar producera metangas dag 16 medan ympen fortsätter att producera gas, därför ser kurvan för flaska 1 i  $S_{C/N}$ -fallet ut att sjunka i slutet.

I figur 7 har de olika rötningsflaskorna inom varje fall definierats, som 1, 2, och 3. Denna definition gjordes i efterhand för att tydligare visa vilka rötningsflaskor som jämförs under t-testet. Det går därför inte att se vilken rötningsflaska inom ett visst fall som hade en specifik position i vattenbadet. Figur 7 visar att  $S_{Förh. S}$  har ett högre metangasutbyte än  $S_{Förh.}$ . Figuren visar även att resultatet från  $S_{C/N}$  är otydligt med både högst ( $S_{C/N 2}$ ) och lägst ( $S_{C/N 1}$ ) metangasutbyte.  $S_{Förh. 1}$  har ett metangasutbyte på 188 Nml/g VS,  $S_{Förh. 2}$  på 178 Nml/g VS och  $S_{Förh. 3}$  på 194 Nml/g VS.  $S_{Förh. S 1}$  har ett metangasutbyte på 221 Nml/g VS,  $S_{Förh. S 2}$  på 219 Nml/g VS och  $S_{Förh. S 3}$  på 208 Nml/g VS.  $S_{C/N 1}$  har ett metangasutbyte på 168 Nml/g VS,  $S_{C/N 2}$  på 230 Nml/g VS och  $S_{C/N 3}$  på 179 Nml/g VS.



Figur 7. Producerad mängd metangas per gram VS för alla flaskor inom alla fall som undersöktes i första rötningsexperimentet.

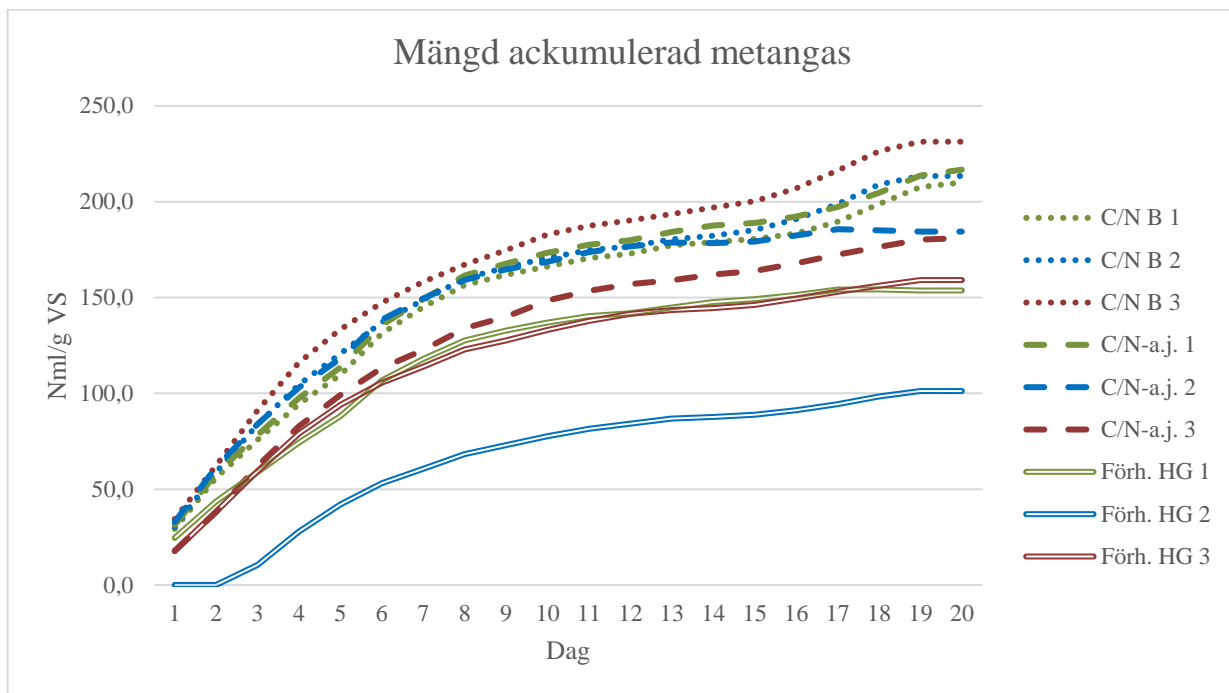
Figur 8 visar den producerade mängden metangas per dag och g VS för alla fall under det första rötningsexperimentet. Ett medelvärde har tagits för varje fall och ympens metangasproduktion är borträknat för respektive fall.



Figur 8. Medelvärde över producerad mängd metangas per dag och g VS för alla fall från det första rötningsexperimentet.

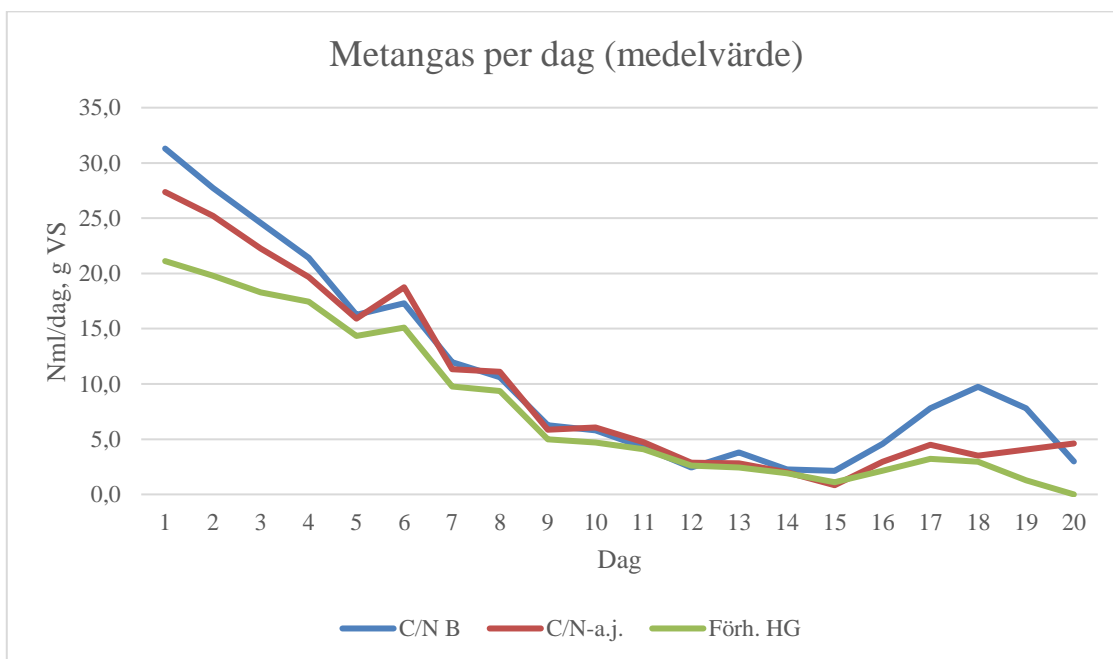
## 5.2.2 Rötningsexperiment 2

Figur 9 visar den producerade mängden metangas från varje flaska inom varje fall som ingår i det andra rötningsexperimentet. Den metangas som ympen har producerat är borträknat i grafen så att figuren enbart visar den metangas som producerats från substratblandningarna. I figur 9 har flaskorna inom varje fall definierats, som 1, 2 och 3. Till skillnad från rötningsexperiment 1 gjordes definieringen innan rötningen började och det går därför att se vilken flaska som har stått var i vattenbadet. Figuren visar att  $S_{C/N B}$  har högst metangasutbyte och  $S_{Förh. HG}$  har lägst metangasutbyte.  $S_{C/N B 1}$  har ett metangasutbyte på 210 Nml/g VS,  $S_{C/N B 2}$  på 213 Nml/g VS och  $S_{C/N B 3}$  på 231 Nml/g VS.  $S_{C/N-a.j. 1}$  har ett metangasutbyte på 217 Nml/g VS,  $S_{C/N-a.j. 2}$  på 184 Nml/g VS och  $S_{C/N-a.j. 3}$  på 181 Nml/g VS.  $S_{Förh. HG 1}$  har ett metangasutbyte på 154 Nml/g VS,  $S_{Förh. HG 2}$  på 101 Nml/g VS och  $S_{Förh. HG 3}$  på 159 Nml/g VS.



Figur 9. Mängd ackumulerad metangas per gram VS för alla flaskor inom alla fall från andra rötningsexperimentet.

Figur 10 visar den producerade mängden metangas per dag och g VS för alla fall under det andra rötningsexperimentet. Ett medelvärde har tagits för varje fall och ympens metangasproduktion är borträknat för respektive fall.



Figur 10. Medelvärde över producerad mängd metangas per dag och g VS för alla fall under andra rötningsexperimentet.

### 5.2.3 T-test

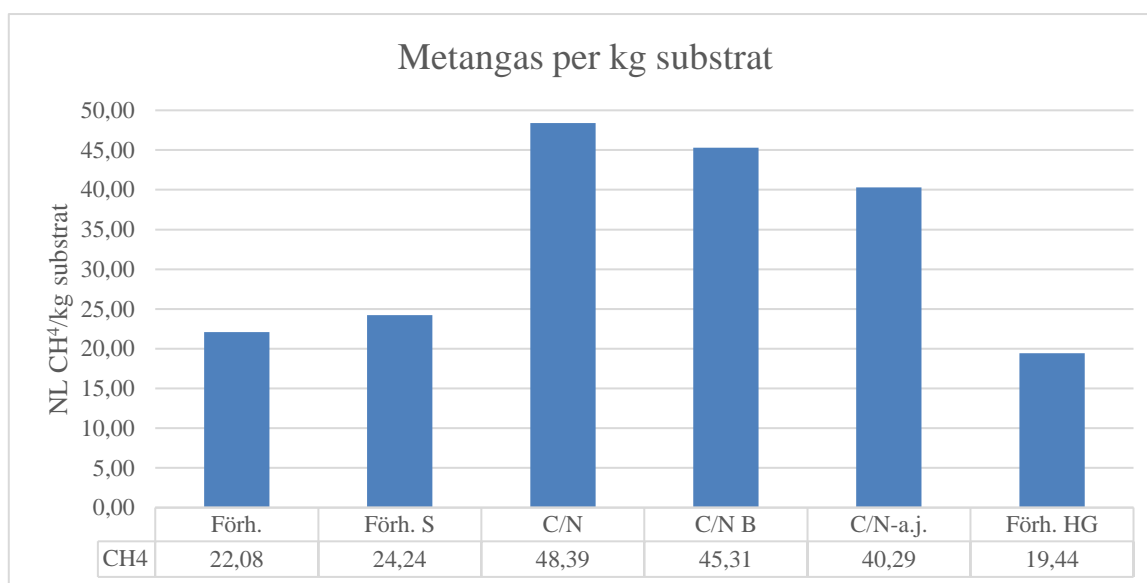
Tabell 10 visar resultatet från t-testet, där ett resultat under 0,05 betyder att det är en signifikant skillnad mellan fallen. Tabellen visar enbart de t-test som resulterade i en signifikant skillnad, för fullskaligt resultat från t-testet se bilaga 4.

Tabell 10. T-test över de olika fallens metangasproduktion.

Fall som jämförs	Resultat (p)	Signifikant skillnad? (0,05<p)
Medelvärde $S_{C/N\ B}$ – Medelvärde $S_{Förh.\ HG}$	0,016	Ja
Medelvärde $S_{Förh.\ s.}$ – Medelvärde $S_{Förh.\ HG}$	0,008	Ja
$S_{C/N.2} - S_{C/N.1}$	0,039	Ja
$S_{C/N.2} - S_{C/N.3}$	0,005	Ja
$S_{Förh.\ HG.2} - S_{Förh.\ HG.1}$	0,00005	Ja
$S_{C/N.2} - S_{Förh.1}$	0,032	Ja
$S_{C/N.2} - S_{Förh.3}$	0,044	Ja
$S_{Förh.2} - S_{C/N.2}$	0,008	Ja
$S_{Förh.2} - S_{Förh.\ s.1}$	0,026	Ja
$S_{C/N\ B.3} - S_{C/N\ -a.j.3}$	0,036	Ja

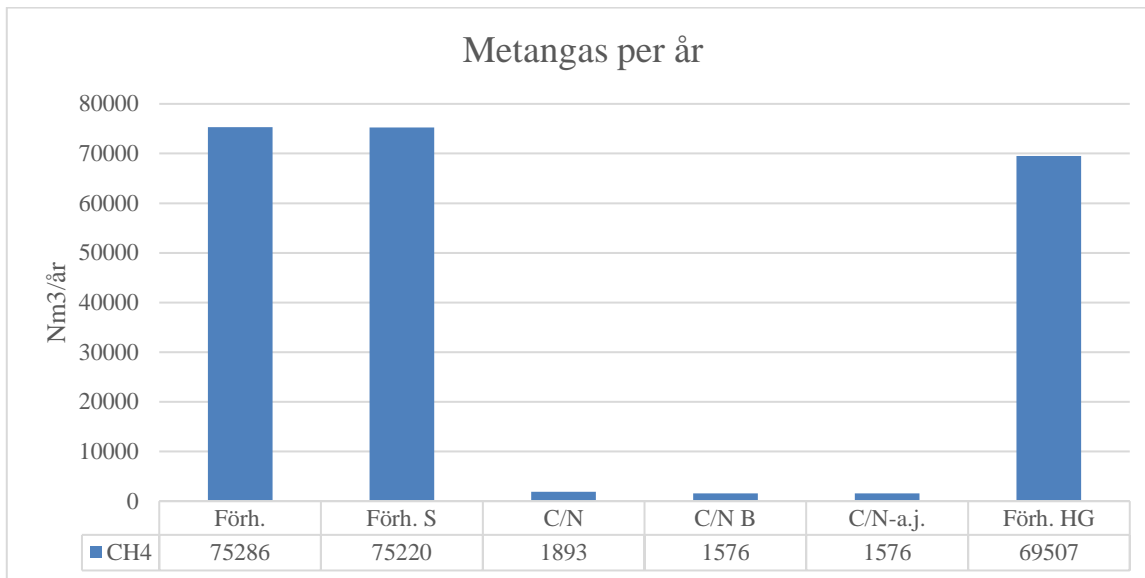
### 5.3 Metangasutbyte, per kg substrat och per år

Figur 11 visar volymen metangas som kan produceras per kilogram substrat för alla fall. Högst volym metangas per kilogram substrat fås från  $S_{C/N}$  (48,39 NL/kg) och lägst volym metangas per kilogram substrat fås från  $S_{Förh.\ HG}$  (19,44 NL/kg). Figuren visar att de fall som har rötats utifrån ett optimalt C/N-värde ( $S_{C/N}$ ,  $S_{C/N\ B}$  och  $S_{C/N-a.j.}$ ) har en högre metangasvolym per kilogram substrat än de fall som har rötats utifrån vilket förhållande substraten finns tillgängliga i, på Lillerud ( $S_{Förh.}$ ,  $S_{Förh.\ s}$  och  $S_{Förh.\ HG}$ ).



Figur 11. Volym metangas som kan produceras per kilogram substrat för alla fall.

Figur 12 visar volymen metangas som kan produceras per år, på Lillerudsskolan, för alla fall. Figuren visar att störst volym metangas per år fås från  $S_{Förh.}$ , tätt följt av  $S_{Förh.\ s}$ . Lägst volym metangas per år fås från  $S_{C/N\ B}$  och  $S_{C/N-a.j.}$ , tätt följt av  $S_{C/N}$ . Figur 12 visar att de fall som har rötats utifrån vilket förhållande substraten finns tillgängliga i, på Lillerudsgymnasiet ( $S_{Förh.}$ ,  $S_{Förh.\ s}$  och  $S_{Förh.\ HG}$ ) har en betydligt högre metangasvolym per år än de fall som har rötats utifrån ett optimalt C/N-värde ( $S_{C/N}$ ,  $S_{C/N\ B}$  och  $S_{C/N-a.j.}$ ).



Figur 12. Volym metangas som kan produceras per år för respektive fall.

## 5.4 Sammansättning och innehåll efter rötning

Tabell 11 visar pH-värde, mängd kol (TOC), VFA, ammonium (NH<sub>4</sub>-N) och fosfat (PO<sub>4</sub>-P) för rötresterna från alla fall och ymp. Ex.1 står för rötningsexperiment 1 och ex. 2 står för rötningsexperiment 2.

Tabell 11. Tabell över pH, TOC, VFA, ammonium (NH<sub>4</sub>-N) och fosfat (PO<sub>4</sub>) i rötresterna för alla fall samt ympen.

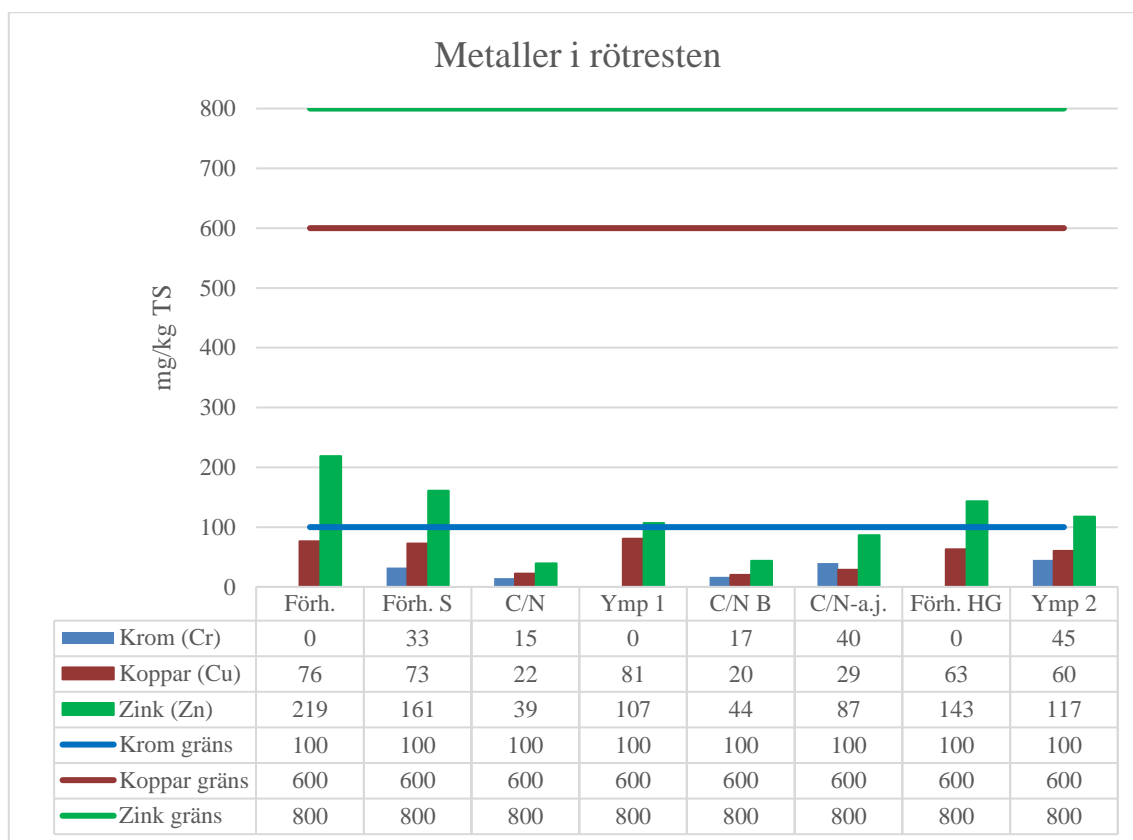
	pH	TOC [mg/l]	VFA [mg/l]	NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	PO <sub>4</sub> -P [mg/l]
<b>S</b> Förh.	7,21	311	221	233	18,5
<b>S</b> Förh. s.	7,17	363	219	201	30,0
<b>S</b> C/N	7,02	268	150	227	17,7
<b>Ymp ex. 1</b>	7,62	198	110	156	16,5
<b>S</b> C/N B	6,95	215	197	253	20,4
<b>S</b> C/N -a.j.	6,94	249	207	203	25,1
<b>S</b> Förh. HG	6,98	294	237	210	28,4
<b>Ymp ex. 2</b>	7,29	231	177	195	20,7

Tabell 12 visar utröttningsgraden, i procent, för alla fall. Utröttningsgraden mättes två gånger, f.1 och f.2, för fallen under andra rötningsexperimentet och ympen och en tredje gång, f.3, för **S**Förh. HG-fallet och ympen vid andra rötningförsöket. Tabell 12 visar att resultatet om utröttningsgraderna är rimliga under det första rötningsexperimentet men inte under det andra rötningsexperimentet, vilket är anledningen till att de mättes flera gånger.

Tabell 12. Utröttningsgrad för alla fall.

	Utröttningsgrad f.1 [%]	Utröttningsgrad f.2 [%]	Utröttningsgrad f.3 [%]
<b>S</b> Förh.	47	-	-
<b>S</b> Förh. s.	62	-	-
<b>S</b> C/N	68	-	-
<b>Ymp ex. 1</b>	39	-	-
<b>S</b> C/N B	11	22	-
<b>S</b> C/N -a.j.	24	28	-
<b>S</b> Förh. HG	15	1,3	0,8
<b>Ymp ex. 2</b>	17	2,8	26

Figur 13 visar mängden metaller i rötresterna för de olika fallen. Figuren visar enbart de metaller som, för minst ett fall, hade en detekterbar mängd. Metallerna som visas i figuren är krom, koppar och zink. Mängden nickel, kvicksilver, kadmium och bly var inte detekterbar för någon av fallen. Linjerna i grafen är gränsvärdena för hur mycket av respektive metall det får vara i rötresterna för att kunna certifieras enligt SPCR 120 och är hämtade från tabell 3. Figur 13 visar att mängden metaller i rötresterna är under maxvärdena, för alla metaller, för alla fall.



Figur 13. Mängd krom, koppar och zink i rötresten för alla fall.

## 5.5 Nationell och internationell biogaspotential

I Sverige fanns det år 2021 1 453 303 nötkreatur, fördelat på 15 227 företag. Det fanns även 1 350 947 grisar fördelat på 1190 företag (Jordbruksverket 2022). Senaste tillfället som Jordbruksverket undersökte mängden hästar i Sverige var 2016 och antalet uppskattades då till 355 500 (Jordbruksverket 2016b). En ko uppskattas producera 15 kg gödsel per dag, en häst 14 kg gödsel per dag och en gris 4,5 kg gödsel per dag (Abbas et al. 2022), (Nanda et al. 2016), (Freitas et al. 2022). Detta gör att det bildas cirka 12 miljoner ton gödsel per år från ko, häst och gris i Sverige. 2021 var mängden gödsel som används till biogasproduktion 1,24 miljoner ton. Gödseln rötades då på 76 biogasanläggningar, där 52 är gårdsanläggningar och övriga är samrötningsanläggningar (Energigas Sverige 2023). Det betyder att cirka 10 % av all gödsel från häst, gris och ko i Sverige rötas till biogas.

I Sverige år 2022 fanns det 3 728 företag med blandat jordbruk, det vill säga både djurhållning och växtodling. Av dessa jordbruk hade 63% större andel djurhållning än växtodling. Det fanns 1 592 företag med blandad skötsel av lantbruksdjur (Jordbruksverket u.å).

Under 2018 använde 125 miljoner människor biogas för matlagning världen över, varav 89 % bodde i Kina. Biogasproduktion i hushålls-skala och mindre storskaliga biogasanläggningar är de två huvudsakliga formerna av biogasproduktion i Kina. Under 2018 fanns totalt 39 miljoner hushålls-biogasanläggningar och 108 000 mindre storskaliga biogasanläggningar i Kina. Över 11 miljarder m<sup>3</sup> biogas producerades 2018 i Kina, där mer än 75 % av biogasen kom från hushållsanläggningar. I Kina har biogasproduktionen från hushållsanläggning minskat sedan 2014, samtidigt som den ökat i andra

asiatiska länder och Afrika. Endast cirka 19 % av biogasproduktionspotentialen på landsbygden i Kina används (Huang et al. 2022). 2017 uppskattades den totala volymen gödsel i Kina till 1990 miljoner ton, där 51% kommer från gris, 20 % från ko, 18% från får och 11% från fågel (Wang et al. 2021).

Biogasproduktionen varierar världen över. Produktionen och användningen av biogas i Europa har ökat snabbt under de senaste 20 åren men har börjat stanna av under den senaste tiden. Ett stort antal hushållsanläggningar för biogasproduktion har byggts i Afrika men endast ett fåtal är i bruk på grund av att det saknas kompetens inom drift och underhåll av anläggningarna. Biogasproduktionen i Brasilien har visat långsam tillväxt på grund av att det inte finns tillräckligt med policyer som bidrar till att öka produktionen. Förutom policyfrågor anses brist på kunskap och teknik i drift och underhåll av biogasanläggningar vara kritiska faktorer som påverkar genomförandet av biogasprojekt i många utvecklingsländer (Huang et al. 2022).

## 5.6 Känslighetsanalys

Tabell 13 visar den procentuella skillnaden i mängd ymp och mängd substrat som används vid det andra rötningsexperimentet om den faktiska andelen VS i ympen (4,32%) hade använts i stället för den antagna (3,65%). Skillnaden visas för de fall som undersöktes i det andra rötningsexperimentet samt ympen.

Tabell 13. Skillnad i mängd substrat och mängd ymp med korrekt VS för ympen i stället för antaget.

	Skillnad mängd substrat [%]	Skillnad mängd ymp [%]
$S_{C/NB}$	0,117	15,14
$S_{C/N-a.j.}$	0,117	15,14
$S_{Förh. HG}$	0,089	15,98
Ymp	-	15,05

## 6 Diskussion

### 6.1 Sammansättning och innehåll innan rötning

pH-värdet är inom det, enligt Seadi et al. (2008), rekommenderade intervallet (6,5–8,0) för alla fall innan rötningen startade, även om  $S_{C/N}$ -fallet och  $S_{Förh. HG}$ -fallet är väldigt nära att ha för högt pH, se tabell 9.  $S_{C/N}$  hade ett pH-värde på 7,98 och  $S_{Förh. HG}$  hade ett pH-värde på 7,95.

Eftersom pH-värdet för  $S_{Förh. s.}$ -fallet är så pass mycket högre än för kogödseln (som hade ett pH-värde på 6,83), antas kranvattnet vara det som höjer pH-värdet, då  $S_{Förh. s.}$ -fallet består till 97% av kogödsel. Kranvatten har ett pH-värde på 8,1 – 8,5 (Karlstad kommun 2022) medan avjoniserat vatten har ett pH-värde på 7 (Purtech u.å).  $S_{C/N-a.j.}$ -fallet, som har fått avjoniserat vatten för att få lägre pH-värde än  $S_{C/N}$ -fallen, har högre pH-värde än  $S_{C/NB}$ -fallet, se tabell 9. pH-värdet mättes dagen efter substratblandningen gjordes och blandningen fick under den tiden stå i kylan. Det är dock inte någon större skillnad mellan pH-värdena i fallen och en anledning till att fallet med avjoniserat vatten fick högre pH-värde kan vara att vattnet, avjoniserat eller inte, inte har så stor påverkan på substratblandningens pH-värde som det antogs. Avjoniserat vatten är inget som antas kan komma att användas på Lillerud i framtiden utan det undersöks enbart för att ta reda på om ett lägre pH-värde har en stor påverkan på rötningssprocessen.



Mängden VFA bör, enligt Jiang et al. (2018), vara under 20 g/L, vilket den är för alla fall. Ammonium (NH<sub>4</sub>-N) ska, enligt Carlsson och Uldal (2009), vara under 2-3 g/l vilket den är för alla fall.

Det var en viss skillnad mellan mängden VS och TS i de olika substraten mellan första och andra rötningen, se tabell 11. Avrens har väldigt stor skillnad i TS och VS, vilket är på grund av att den avrens som togs inför det andra rötningförsöket var mycket blötare än den som togs inför det första rötningförsöket. Grisgödseln hade även relativt stor skillnad i TS och VS mellan de olika rötningförsöken. Detta beror på att grisgödselns sammansättning kan variera beroende på hur stor andel halm grisgödseln är blandad med och hur färskt grisgödseln är. Gödseln från gris förvaras även på en gödselstack som är placerad utomhus, vilket gör att gödselns TS även kommer att påverkas av väder och vind.

## 6.2 Rötning

$S_{\text{Förh. s}}$ -fallet har ett högre metangasutbyte (216 Nml/g VS) än  $S_{\text{Förh.}}$ -fallet (187 Nml/g VS) vilket indikerar att spån har en negativ påverkan på biogasprocessen, se figur 6.  $S_{\text{Förh. HG}}$  har ett betydligt lägre metangasutbyte (156 Nml/g VS) än resterande fall vilket indikerar att en ökad mängd hästgödsel med halm ger ett sämre metangasutbyte. Dock innehåller alla fall där C/N-halten har optimerats mer hästgödsel än  $S_{\text{Förh. HG}}$  vilket motsäger den teorin. En möjlig förklaring kan vara att  $S_{\text{C/N}}$ -fallen innehåller en högre mängd matavfall, vilket enligt Deena et al. (2022) har ett högre metangasutbyte än de andra substrat som ingått i detta examensarbete, och på så sätt ökar metangasutbytet så att det ändå blir högre än  $S_{\text{Förh. HG}}$ -fallet, trots den högre mängden hästgödsel. En annan förklaring kan vara att det betydligt bättre C/N-värdet i  $S_{\text{C/N}}$ -fallen, se tabell 6 och 7, bidrar till att ge de fallen högre metangasutbyte än  $S_{\text{Förh. HG}}$ -fallet.  $S_{\text{C/N}}$  har ett lägre metangasutbyte (192 Nml/g VS) än  $S_{\text{C/N B}}$  (218 Nml/g VS), vilket troligtvis är på grund av bristande omrörning. Att  $S_{\text{C/N -a.j.}}$ -fallet har lägre metangasutbyte (194 Nml/g VS) än  $S_{\text{C/N B}}$  (218 Nml/g VS) kan bero på att  $S_{\text{C/N B}}$  har ett lämpligare, lägre pH-värde, se tabell 9.

De fall som har blandats för att få optimala C/N-värden innehåller högre mängder grisgödsel, ensilage och avrens än resterande fall. Det är dock svårt att dra slutsatser om dessa substrat i sig har bidragit till ett högre metangasutbyte eftersom det inte syns någon tydlig skillnad mellan substratblandningarna som har optimerad C/N-halt och substratblandningarna som har blandats utifrån Lillerudsskolans substratförhållanden, se figur 6. Det som går att säga är att grisgödsel, ensilage och avrens har bidragit till en lämpligare C/N-halt vilket troligen resulterat i det höga metangasutbytet för  $S_{\text{C/N B}}$ -fallet, se figur 6 och tabell 7.

### 6.2.1 Rötningsexperiment 1

Under det första rötningsexperimentet varierar den dagliga metangasproduktionen kraftigt, vilket syns i figur 8. Variationen antas bero på påfyllnaden av vatten till vattenbadet och på att temperaturen på vattnet som fylldes på inte var exakt 37 °C. Under det första rötningsexperimentet antecknades inte vilken tid och dag som vattnet fylldes på, vilket gör att det inte går att förknippa fluktuationerna i figur 8 med tiden då vattenbadet fylldes på. Tiden som kurvorna i figur 8 börjar sjunka, alltså vid dag 3, 6 och 9, kan dock stämma överens med tiden då vattenbadet fylldes på, eftersom det fylldes på cirka var tredje dag och bör ha fyllts på för första gången vid dag 3. Metangasproduktionen bör då sakta börja stiga igen när temperaturen har stabiliserats och mikroorganismerna har återhämtat sig, vilket den gör i figur 8.

Den fluktuerande metangasproduktionen beror troligtvis inte på den bristande omrörningen eftersom omrörningen bör ha påverkat olika flaskor olika mycket och fluktuationerna i figur 8 är relativt lika för alla fall.

Figur 8 visar även att det inte hade varit rimligt att röta under längre tid än vad som gjordes, eftersom den dagliga biogasproduktionen är låg eller noll under de sista dagarna av rötning.

I figur 7 syns det tydligt att  $S_{Förh. s.}$ -fallet har högre metangasutbyte än  $S_{Förh.}$ -fallet, eftersom alla flaskor som hör till  $S_{Förh. s.}$ -fallet har producerat mer metangas (208 - 221 Nml/g VS) än alla flaskor som hör till  $S_{Förh.}$  (178 - 194 Nml/g VS). Detta resultat styrker hypotesen om att spån påverkar biogasprocessen negativt, då spånet är det enda som skiljer fallen åt. Det stämmer även överens med studien av Böske et al (2015) och studien av Wartell (2012) vars resultat säger att spån har ett lågt biogasutbyte. T-testet visar dock att det inte är någon signifikant skillnad mellan metangasproduktionen för  $S_{Förh.}$ -fallet och  $S_{Förh. s.}$ -fallet sett till medelvärdet, se bilaga 4. När t-testet görs mellan enskilda flaskor från  $S_{Förh.}$  och  $S_{Förh. s.}$  visar resultatet att det är en signifikant skillnad mellan  $S_{Förh.2}$  och  $S_{Förh. s.1}$ , se tabell 10. Det är fortfarande möjligt att röta en substratblandning som innehåller spån men biogasutbytet kommer då, enligt resultaten, att bli något lägre. Anledningen till att spånet bidrar med lägre biogasutbyte kan dels vara orsakat av att det innehåller lignin och extraktivämnen som hindrar den mikrobiologiska processen (Henriksson 2020). En annan orsak kan vara att spånet är svårare att bryta ner, vilket Wartell:s (2012) resultat visar, och enbart tar upp plats i processen men inte bidrar med någon metangas.

T-testet visar även att det inte är någon signifikant skillnad mellan flaskorna inom  $S_{Förh.}$  och mellan flaskorna inom  $S_{Förh. s.}$ , se bilaga 4. Detta visar att variationen inom  $S_{Förh.}$  och  $S_{Förh. s.}$  är liten och gör de resultaten mer trovärdiga.

$S_{C/N}$ -fallets resultat var otydligt, som visas i figur 7, där en flaska, från det fallet, har producerat den högsta volymen metangas (230 Nml/g VS) medan en annan flaska har producerat den lägsta metangasvolymen (168 Nml/g VS). T-testet visade även att det är en signifikant skillnad mellan flaskorna inom  $S_{C/N}$ -fallet, se tabell 10. En anledning till detta kan vara att  $S_{C/N}$ -fallet var placerat sist i omrörningskopplingen och som en följd fick svagast omrörning av alla fall. De två sista flaskorna från fallet kan under slutet av rötningen inte fått någon omrörning alls, vilket kan ha lett till de låga metangasutbytena. Medan den första flaskan i  $S_{C/N}$ -fallet kan ha fått omrörning under hela rötningen vilket resulterar i att det biogasutbytet är större. Eftersom  $S_{C/N}$ -fallet gav ett mindre pålitligt resultat med stor variation men har potential att få högt biogasutbyte, rötas detta fall om i det andra rötningsexperimentet.

Resultaten om metangasutbytena per gram VS är liknande de som har fåtts i tidigare studier.  $S_{Förh. s.}$  består till 97% av kogödsel och har ett metangasutbyte på 216 Nml/g VS medan Demichelis et al. (2022), som har rötat enbart kogödsel, har fått ett metangasutbyte på cirka 193 Nml/g VS. Att denna studies resultat är liknande tidigare studier ökar resultatets trovärdighet.

$S_{Förh.}$ , som innehåller mer hästgödsel än  $S_{Förh. s.}$ , har ett lägre metangasutbyte än  $S_{Förh. s.}$ . Tidigare litteratur om hästgödsls metangasutbyte varierar, där viss litteratur säger att det har lägre utbyte än kogödsel, som Wriland et al. (2023), medan annan säger att den har högre, som Czubaszek et al. (2022), se avsnitt 3.4. Det är därför svårt att säga om denna studies resultat stämmer överens med tidigare forskning.

## 6.2.2 Rötningsexperiment 2

I det andra rötningsexperimentet skedde mindre fluktuationer i den dagliga metangasproduktionen, jämfört med det första rötningsexperimentet, se figur 10. Detta är ytterligare en indikation på att det var vattnet som fylldes på i vattenbadet som inte hade rätt temperatur som påverkade metangasproduktionen. Figur 10 visar dock fortfarande på vissa fluktuationer vilket kan förklaras av att omrörningsmekanismen kopplades om. När omrörningen kopplades om ökade metangasproduktionen för de flaskor som fick en bättre omrörning än tidigare.

Likt det första rötningsexperimentet är den dagliga metangasproduktionen låg eller noll under de sista dagarna av rötning, se figur 10. Detta indikerar att rötningsexperimentet inte behöver pågå under längre tid.

Under andra rötningsexperimentet är metangasutbytet från  $S_{Förh. HG. 2}$  felaktigt eftersom biogasproduktionen inte startar förens den andra dagen av rötningen, vilket syns i figur 9. Därför har medelvärdena för  $S_{Förh. HG}$  enbart tagits från flaskor 1 och 3.

Figur 9 visar att  $S_{C/N B}$  har högst metangasutbyte under andra rötningförsöket (210 – 231 Nml/g VS), följt av  $S_{C/N -a.j.}$  (181 – 217 Nml/g VS) medan  $S_{Förh. HG}$  har lägst metangasutbyte (101 – 159 Nml/g VS). Dock visar t-testet att det inte är någon signifikant skillnad mellan medelvärdet över  $S_{C/N B}$  och medelvärdet över  $S_{C/N -a.j.}$ , se bilaga 4. Det är inte heller någon signifikant skillnad mellan medelvärdet över  $S_{C/N -a.j.}$  och medelvärdet över  $S_{Förh. HG}$ , enligt t-testet. T-testet visar att det är en signifikant skillnad mellan medelvärdena över  $S_{C/N B}$  och  $S_{Förh. HG}$ , vilket säkerhetsställer att  $S_{C/N B}$  har signifikant högre metangasutbyte än  $S_{Förh. HG}$ . T-testet visade även att det inte är någon signifikant skillnad inom  $S_{C/N B}$ ,  $S_{C/N -a.j.}$  eller inom  $S_{Förh. HG}$  (när flaskor 2 i  $S_{Förh. HG}$  exkluderas) vilket gör resultaten från de fallen mer trovärdiga.

$S_{C/N B}$  och  $S_{C/N -a.j.}$  har högre metangasutbyte än  $S_{Förh. HG}$ , se figur 9, vilket kan bero på att  $S_{C/N B}$  och  $S_{C/N -a.j.}$  har ett mer lämpligt C/N-värde än  $S_{Förh. HG}$ .

## 6.3 Metangasutbyte, per kg substrat och per år

Metangasutbytet per kg substrat är störst för  $S_{C/N}$ -fallet (48,39 NL/kg), se figur 11, även fast att  $S_{Förh. s.}$  och  $S_{C/N B}$  har ett högre biogasutbyte per g VS. Detta beror på att andelen VS i  $S_{C/N}$  (25,15%) är högre innan rötning än vad den är i  $S_{C/N B}$  (20,76%) och  $S_{Förh. s}$  (11,22%).

Metangasutbytena, per kg substrat och per år, är beräknat utan att justera TS-värdena. TS-värdena bör vara cirka 10% för alla substratblandningar innan rötning för en optimal storskalig biogasprocess vilket de inte är för alla fall. Dock kommer detta inte påverka vilket metangasutbyte det blir eftersom TS-mängden för varje substratblandning behöver sänkas genom att spädas med vatten. Oavsett om blandningarna spädas med vatten eller inte kommer ett kilogram substrat, innan det blandas med vatten, ge samma mängd metangas. Skillnaden blir att biogasanläggningen måste dimensioneras större om TS-halten i substratblandningen är högre, eftersom substratblandningen då behöver blandas med en större mängd vatten och den totala volymen (substrat och vatten) blir större.

Metangasvolymen per år är störst för  $S_{Förh. -fallet}$  (75 286 m<sup>3</sup>/år), tätt följt av  $S_{Förh. s. -fallet}$  (75 220 m<sup>3</sup>/år), se figur 12.  $S_{Förh. HG}$  har den tredje största metangasvolymen per år (69 507 m<sup>3</sup>/år) medan  $S_{C/N}$  (1893 m<sup>3</sup>/år),  $S_{C/N B}$  (1576 m<sup>3</sup>/år) och  $S_{C/N a.j.}$  (1576 m<sup>3</sup>/år) har en betydligt mindre metangasvolym trots att metangasutbytet per g VS och per kg substrat är störst för de fallen. Detta beror på att den tillgängliga mängden substrat är betydligt mindre för  $S_{C/N}$ ,  $S_{C/N B}$  och  $S_{C/N a.j.}$  än för  $S_{Förh.}$ ,  $S_{Förh. s.}$  och  $S_{Förh. HG}$ , se

tabell 8. Substratmängderna för  $S_{C/N}$ -fallen begränsas av mängden matavfall som är tillgängligt vid Lillerudsskolan.

Figur 12 visar att  $S_{Förh.}$  har en lite högre metangasvolym per år än  $S_{Förh. s.}$  vilket beror på att mängden hästgödsel med spån är exkluderat i  $S_{Förh. s.}$ , vilket ger  $S_{Förh. s.}$  än lägre mängd tillgänglig substrat, se tabell 8. Likaså har  $S_{Förh. HG}$  en hög metangasvolym per år för att mängden tillgängligt substrat är högre i det fallet, se tabell 8.

Det är även värt att nämna att de fall som har en högre biogasmängd per år, på grund av att de finns mer tillgängligt substrat, inte behöver bli mer lönsamma än de andra fallen. Detta eftersom biogasanläggningen då behöver dimensioneras större och det krävs mer energi för att värma och blanda en större mängd substrat. Det mer ekonomiska alternativet är att ha en substratblandning som har ett högt biogasutbyte per gram VS men ändå finns tillgänglig i en mängd som kan generera en önskvärd volym biogas.

För att få större mängd metangas per år från  $S_{C/N}$ ,  $S_{C/N B}$  och  $S_{C/N a.j.}$  behövs det en större mängd matavfall. En möjlig lösning är att Lillerudsgymnasiet får in ytterligare matavfall från en extern källa. Detta skulle kunna vara närliggande restauranger, skolor, slakteri och/eller större mataffärer med mera.

#### 6.4 Sammansättning och innehåll efter rötning samt metaller i rötresten

Mängden nickel, kvicksilver, kadmium och bly är för låg för att upptäckas i rötresten för alla fall. Mängden krom, koppar och zink är över noll i de flesta fall men koncentrationerna är alltid långt under den maximala halten som rötresterna får innehålla för att kunna certifieras med SPCR 120, se figur 13. Utifrån mängden metaller är alltså rötresterna lämpliga som biogödsel.

Figur 13 visar att zink är den metall som finns i störst mängd i rötresterna för alla fall. I näst störst mängd finns koppar för alla fall, förutom  $S_{C/N a.j.}$ -fallet.

Figur 13 visar att  $S_{Förh.}$ -fallet har högre mängd zink än  $S_{Förh. s.}$ -fallet vilket indikerar att hästgödseln med spån innehåller zink då det är det enda som skiljer fallen åt, se tabell 9 och 10. Figuren visar även att  $S_{C/N}$ ,  $S_{C/N B}$  och  $S_{C/N a.j.}$  har mindre mängd metaller, speciellt zink, vilket indikerar att kogödseln innehåller större mängd metaller än övriga substrat, förutom hästgödseln med spån. Detta eftersom det är kogödseln som har minskat i mängd i  $S_{C/N}$ -fallen jämfört med resterande fall, se tabell 9 och 10.

C/N-värdena är under det, enligt Carlsson och Udal (2009), rekommenderade området för  $S_{Förh.-}$ ,  $S_{Förh. s.}$ - och  $S_{Förh. HG}$ -fallet vilket kan leda till ackumuleringar av ammonium som kan vara giftigt för röttningsprocessen. Tabell 11 visar att ammoniummängden för alla fall är inom det, enligt Carlsson och Udal (2009), rekommenderade området i rötresten, vilket indikerar att det inte har skett någon ammonium-ackumulering. Dock kunde enbart ammoniumet som är fritt i vattnet mätas vilket gör att det inte går att vara säker på att mängden ammonium är inom det rekommenderade området i den fasta fasen. Enligt Seadi et al. (2008) ska pH-värdena vara mellan 6,5 och 8,0, vilket det är i rötresterna för alla fall. VFA ska, enligt Jiang et al. (2018), vara under 20 g/l vilket det är i rötresterna för alla fall.

Fosformängden i rötresterna för de olika fallen (cirka 16 – 30 mg/l) är långt under vad den är i rötresterna från storskaliga samröttningsanläggningar, som är mellan 300 – 500 mg/l (Avfall Sverige et al. 2013). Dock är det enbart möjligt att mäta mängden fosfor som är fritt i vattnet och det går därför inte att veta mängden fosfor som finns i den fasta fasen av rötresterna. Detta gör att det blir svårt att jämföra mängden fosfor i rötresterna med mängden fosfor från storskaliga biogasprocesser. Något som går att se i tabell 11 är att mängden fosfor är betydligt mindre än mängden kväve (i form av ammonium) vilket är fördelaktigt då växter behöver en större mängd kväve än fosfor.

Utröttningsgraden för  $S_{Förh. s.}$ -fallet (62%) är högre än  $S_{Förh.}$ -fallet (47%), se tabell 12, vilket är rimligt då  $S_{Förh. s.}$  producerar mer metangas. Att  $S_{C/N}$ -fallet har en så pass hög utröttningsgrad (68%) kan bero på att det bildas mycket biogas men att halten metangas är lägre än för resterande fall, vilket gör att det ser ut som att det bildas mindre biogas.

Utröttningsgraderna är inom rimliga intervall för  $S_{Förh.}$ -,  $S_{Förh. s.}$ -,  $S_{C/N}$ -fallet och ympen under första rötningsexperimentet, se tabell 12. Under andra rötningsexperimentet blev utröttningsgraderna orimligt låga vilket är anledningen till att de undersöktes igen för  $S_{C/N B}$ ,  $S_{C/N a.j.}$ ,  $S_{Förh. HG}$  och ympen. Till exempel är det inte rimligt att  $S_{C/N B}$ -fallet, som har en av de högsta metangasproduktionerna, enbart har en utröttningsgrad på 11% när  $S_{Förh.}$ -fallet, som har näst lägst metangasproduktion, har en utröttningsgrad på 47%.

När utröttningsgraden undersöktes igen blev resultatet fortfarande orimligt, samt att det var väldigt olika resultat jämfört med tidigare utröttningsgrad för samma fall, se tabell 12. Utröttningsgraden blev speciellt orimlig för  $S_{Förh. HG}$  och ympen, vilket gjordes att de undersöktes en tredje gång. Utröttningsgraden blev, vid tredje försöket, fortfarande inte mer trovärdig, se tabell 12, där  $S_{Förh. HG}$ -fallets värde blev väldigt lågt och ympens värde blev olikt de två föregående utröttningsgraderna.

Det är svårt att motivera varför utröttningsgraderna blir så orimliga för  $S_{C/N B}$ ,  $S_{C/N a.j.}$ ,  $S_{Förh. HG}$  och ymp ex. 2 men något som går att påpeka är att det är små marginaler när VS ska mätas och utröttningsgraderna beräknas. Till exempel gör en skillnad i  $VS_{ut}$  från 0,71% till 0,83% av  $S_{Förh. HG}$  får en utröttningsgrad på 1% istället för 15%. Om den substratblandning som torkas för att mäta VS råkar innehålla en lite högre eller lägre TS-halt kommer utröttningsgraden att påverkas stort, eftersom mer TS ger mer VS och tvärtom.

## 6.5 Nationell och internationell biogaspotential

Ett blandat jordbruk, med både djur och grödor, ger en möjlighet att samröta olika substrat för att få en bättre C/N-halt och då även ett bättre biogasutbyte, som det görs i  $S_{C/N B}$ -fallet. De gårdar som inte har blandat jordbruk skulle kunna samverka med andra gårdar för att få en samrötning av olika substrat. Detta är en bra idé i teorin men kan vara svårare i praktiken på grund av till exempel transporthinder. Biogasproduktionen kan bli mindre lönsam på grund av att de är stora avstånd mellan gårdarna eller att varje gård genererar så lite substrat så att transportererna behöver ske många gånger.

Resultatet visar att det scenario,  $S_{Förh. s.}$ , där nästan bara kogödsel rötas (cirka 97% kogödsel) har ett av de högsta biogasutbytena, vilket indikerar att biogasproduktionen skulle vara minst lika hög för en gård som enbart rötar kogödsel jämfört med en gård som samrötar olika substrat.

Kina ligger i framkant när det gäller småskalig biogasproduktion, enligt Huang et al. (2017), men det finns ändå en potential att ytterligare öka produktionen. Förhållande mellan respektive gödsel-sort är inte liknande i Kina som det är på Lillerudsskolan, eftersom Lillerud har övervägande del kogödsel medan Kina har störst andel grisködsel. Dock finns det, enligt Wang et al. (2021), cirka 398 miljoner ton kogödsel i Kina som skulle kunna rötas likt  $S_{Förh. s.}$ -fallet. Det är också möjligt att blanda och röta Kinas substrat utifrån ett optimalt C/N-värde men att det då blandas på ett annat sätt än vad det föreslås göras på Lillerud.

Det finns många små biogasanläggningar världen över (Huang et al. 2022) vilket visar att det kan vara fördelaktigt för privatpersoner, mindre företag eller organisationer att producera biogas för eget bruk. Det går dock att se att de länder där det inte finns styrmedel för biogasproduktion, som Brasilien, har en långsam tillväxt av biogasanläggningar. Även kunskap om hur anläggningarna ska drivas och underhållas är viktig för tillväxten av biogasanläggningar världen över.

## 6.6 Känslighetsanalys

Tabell 13 visar att mängden substrat som används i andra rötningsexperimentet påverkas ytterst lite av det antagna VS-värdet på ympen. Mängden ymp skiljer sig dock ca 15 % för  $S_{C/N\ B^-}$ ,  $S_{C/N\ a.j.}$ - och  $S_{Förh. HG}$ -fallet när det antagna värdet används i stället för det verkliga. Att mängden ymp i de olika fallen är större än de ska vara bör dock inte ha någon större påverkan på resultatet eftersom metangasen som produceras från ympen ändå räknas bort för alla fall.

## 6.7 Osäkerheter och vidare studier

De mätningar som gjordes av VFA, TOC, ammonium ( $NH_4-N$ ) och fosfat ( $PO_4-P$ ) kunde enbart göras i flytande fas, efter att substratblandningarna och rötresterna hade filtrerats. Det går därför inte att säga mycket om vad de totala mängderna är, av respektive ämne, i substraten och rötresterna. Detta betyder att det är svårt att jämföra denna studies resultat med tidigare litteratur gällande lämpliga halter av dessa ämnen. Det är även svårt att veta om ämnena är inom de rekommenderade intervallen eftersom de egentliga mängderna är okända. I vidare studier är det en rekommendation att mäta den totala mängden VFA, TOC, ammonium och fosfat i substratblandningarna och rötresterna.

En annan faktor som bidrar med osäkerhet i studien är att C/N-värdet för de olika substratblandningarna är beräknade utifrån litteratur över vad de olika substraten har för C/N-värde. Detta är en osäkerhet eftersom C/N-värdet för ett visst substrat beror av många olika faktorer och är olika i olika fall, vilket tydligt syns i litteraturen. Ett visst substrat kan ha olika C/N-värden i olika artiklar. För att med större säkerhet veta C/N-värdena i just det substrat som finns på Lillerudsgymnasiet, och på så sätt substratblandningarna som rötas, bör den totala mängden kol och kväve mätas i varje substrat.

## 7 Slutsatser

pH, C/N-halt, mängden VFA, ammonium, TS och VS är alla parametrar som påverkar substratets biogasutbyte.

De fall där de olika substraten blandats för att få ett optimalt C/N-värde gav de högsta biogasutbytet per kilo substrat. På grund av att mängden tillgängligt matavfall är låg, jämfört med annat substrat på Lillerudsskolan, ger dessa fall dock inte den högsta biogasmängden per år. Högst biogasmängd per år, på Lillerudsgymnasiet, fås i stället då substratet rötas i samma förhållande som det finns tillgängligt på skolan, med eller utan hästgödsel med spån.

I Sverige finns det 15 227 gårdar med nötkreatur som skulle kunna röta sitt substrat ungefär likt  $S_{Förh.s.}$ -fallet, eftersom det fallet innehåller cirka 97% kogödsel. Det uppskattas att mängden gödsel som används till rötning i Sverige, sett till häst-, ko- och grisködsel, enbart är 10% av vad som finns tillgängligt. I Kina finns det 398 miljoner ton kogödsel per år som skulle kunna rötas likt  $S_{Förh.s.}$ -fallet. Endast 19% av biogasproduktionspotentialen på landsbygden i Kina används. Detta visar att det finns en stor potential för biogasproduktion från lantbruket i Sverige och Kina.

Om Lillerudsgymnasiet kan få tillgång till en större mängd matavfall, för att kunna blanda substratet utifrån en optimal C/N-halt (likt  $S_{C/N}$ -fallen) och samtidigt utnyttja merparten av resterande substrat,

rekommenderas skolan att röta sitt substrat likt  $S_{C/N}$ -fallet. Detta för att skolan då får det största biogasutbytet per kg substrat och per år jämfört med resterande fall som undersökts.

Ifall att skolan inte kan få tillgång till mer matavfall bör substratet rötas i det förhållande det finns tillgängligt på Lillerudsgymnasiet, eftersom detta ger den högsta biogasmängden per år. Skolan rekommenderas då att utesluta hästgödseln med spån från rötningsprocessen eftersom den inte bidrar med någon biogas eller till och med minskar mängden producerad biogas och enbart tar upp plats under processen. En ökad mängd substrat i biogasprocessen ger ett ökat behov av energi för uppvärmning och omrörning med mera och om det substratet inte bidrar till någon biogasproduktion ger detta enbart en förlust, energimässigt och ekonomiskt.

## 8 Referenser

Abbas, Y., Yun, S., Mehmood, A., Shah, F. A., Wang, K., Eldin, E. T., Al-Qahtani, W. H., Ali, S., Bocchetta, P. (2022). Co-digestion of cow manure and food waste for biogas enhancement and nutrients revival in bio-circular economy. *Chemosphere*, 311, 137018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137018>

Avfall Sverige (2023). *2024 CERTIFIERINGSREGLER FÖR BIOGÖDSEL SPCR 120*. Malmö.

Avfall Sverige, Region Skåne, BIOGASSYS (Life+), Biogas Syd, Kristianstads Biogas AB, Lunds Energikoncern, NSR, Sysav Utveckling, HIR Malmöhus (2013). *Så här fungerar biogödsel*. [https://www.avfallsverige.se/media/r2wpurd1/faktablad\\_biogodsels\\_hela\\_dokumentet.pdf](https://www.avfallsverige.se/media/r2wpurd1/faktablad_biogodsels_hela_dokumentet.pdf) [2023-04-19]

Biogödsel (u.å). *Biogasprocessen*. <https://www.biogodsels.se/vad-aer-biogoedsel/biogasprocessen/> [2023-04-10]

Böske, J., Wirth, B., Garlipp, F., Mumme, J., Van den Weghe, H. (2015). Upflow anaerobic solid-state (UASS) digestion of horse manure: Thermophilic vs. mesophilic performance. *Bioresource Technology*, 175, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.041>

Carlsson, M., Uldal, M. (2009). *Substrathandboken för biogasproduktion*. Svenskt gastekniskt center.

Christensson, K., Björnsson, L., Dahlgren, S., Eriksson, P., Lantz, M., Lindström, J., Mickelåker, M., Andersson, H. (2009). *Gårdsbiogashandboken*. Svenskt gastekniskt center.

Czubaszek, R., Wysocka-Czubaszek, A., Banaszuk, P. (2022). Importance of Feedstock in a Small-Scale Agricultural Biogas Plant. *Energies*, 15(20), 7749. <https://doi.org/10.3390/en15207749>

Deena, S. R., Vickram, A. S., Manikandan, S., Subbaiya, R., Karmegam, N., Ravindran, B., Chang, S. W., Awasthi, M. K. (2022). Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review. *Bioresource Technology*, 355, 127234. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127234>

Demichelis, F., Tommasi, T., Deorsola, F. A., Marchisio, D., Fino, D. (2022). Effect of inoculum origin and substrate-inoculum ratio to enhance the anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste (OFMSW). *Journal of Cleaner Production*, 351, 131539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131539>

Energigas Sverige (2023). *Statistik om biogas*. <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/statistik-om-biogas/> [2023-04-12]

Feng, L., Perschke, Y. M. L., Fontaine, D., Ward, A. J., Eriksen, J., Sørensen, P., Møller, H. B. (2019). Co-ensiling of cover crops and barley straw for biogas production. *Renewable Energy*, 142, 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.138>

Granström, K. (2014). *Regler för hantering av rötrest*. Karlstad: Karlstads Universitet.



- Henriksson, G. (2020). *Kemisk samansättning 3 lignin mm.* [video]. [https://kau.instructure.com/courses/15179/pages/kemisk-sammansattning-3-lignin-mm?module\\_item\\_id=442072](https://kau.instructure.com/courses/15179/pages/kemisk-sammansattning-3-lignin-mm?module_item_id=442072) [2023-03-30]
- Himanshu, H., Murphy, J. D., Grant, J., O’Kiely, P. (2018). Synergies from co-digesting grass or clover silages with cattle slurry in in vitro batch anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 127, 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.086>
- Huang, X., Wang, S., Shi, Z., Fang, L., Yin, C. (2022). Challenges and strategies for biogas production in the circular agricultural waste utilization model: A case study in rural China. *Energy*, 241, 122889. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122889>
- Iea (u.å). *An introduction to biogas and biomethane.* <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane> [2023-06-05]
- Jakobsson Åhs, Ann-Charlotte. (2022). Lärare vid Lillerudsgymnasiet. [Muntlig källa].
- Jarvis, Å., Schnürer, A. (2009). Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar. Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC).
- Jiang, Y., Dennehy, C., Lawlor, P. G., Hu, Z., Zhan, X., Gardiner, G. E. (2018). Inactivation of enteric indicator bacteria and system stability during dry co-digestion of food waste and pig manure. *Science of The Total Environment*, 612, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.214>
- Jordbruksverket (2016a). Rötning av animaliska biprodukter. Jönköping: Jordbruksverket.
- Jordbruksverket (2016b). *Hästar och anläggningar med häst 2016. Resultat från intermittent undersökning.* <https://jordbruksverket.se/om-jordbruksverket/jordbruksverkets-officiella-statistik/jordbruksverkets-statistikrapporter/statistik/2020-09-04-hastar-och-anlaggningar-med-hast-2016-resultat-fran-intermittent-undersokning> [2023-04-10]
- Jordbruksverket (2022). *Jordbruksstatistisk sammanställning 2022.* <https://jordbruksverket.se/om-jordbruksverket/jordbruksverkets-officiella-statistik/jordbruksverkets-statistikrapporter/statistik/2022-07-05-jordbruksstatistisk---sammanstallning-2022> [2023-04-10]
- Jordbruksverket (u.å). *Jordbruksföretagens driftsinriktning efter Storleksgrupp, Kategori, Variabel och År.* 7460fc7f-ec75-4107-b62f-8709d6b76d12 [2023-04-20]
- Karlstad kommun (2022). Dricksvattenkvalitet 2022 – Karlstad, Alster, Skattkärr och Väse. [https://karlstad.se/globalassets/filer/bygga-och-bo/vatten\\_avlopp/dricksvatten2/vattenkvalitet/dricksvattenkvalitet-karlstad-2022.pdf](https://karlstad.se/globalassets/filer/bygga-och-bo/vatten_avlopp/dricksvatten2/vattenkvalitet/dricksvattenkvalitet-karlstad-2022.pdf) [2023-05-16]
- Kovačić, Đ., Kralik, D., Jovičić, D., Spajić, R. (2019). An Assessment of Anaerobic Thermophilic Co-Digestion of Dairy Cattle Manure and Separated Tomato Greenhouse Waste in Lab-Scale Reactors. *Acta Technologica Agriculturae*, 22(2), 38-42. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0007>
- Kusch, S., Schumacher, B., Oechsner, H., Schäfer, W. (2011). Methane yield of oat husks. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2627–2633. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.044>

Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H., Jungbluth, T. (2013). Investigation of the methane potential of horse manure. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 15(2): 161 – 172.

Nationalencyklopedin (u.å). *ensilage*.  
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/ensilage> [2023-03-10]

Purtech (u.å). *The Relationship between pH and Deionized Water*.  
<https://puretecwater.com/storage/app/media/downloads/deionized-water/relationship-between-ph-and-deionized-water.pdf> [2023-06-16]

Rajput, A. A., Zeshan, Hassan, M. (2021). Enhancing biogas production through co-digestion and thermal pretreatment of wheat straw and sunflower meal. *Renewable Energy*, 168, 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.149>

Rivera-Hernández, Y., Hernández-Eugenio, G., Balagurusamy, N., Espinosa-Solares, T. (2022). Sargassum-pig manure co-digestion: An alternative for bioenergy production and treating a polluting coastal waste. *Renewable Energy*, 199, 1336–1344. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.068>

Scantec Nordic (2013). *XRF – Röntgenfluorescens*. <https://www.scantecnordic.se/sv-SE/produktomr%C3%A5den/materialanalys/materialanalys-med-xrf-30053537> [2023-04-20]

Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. (2008) *Biogas handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg.

Svensk biogas (u.å). *Produktion av biogas*. <https://www.svenskbiogas.se/biogas-miljo/produktion-av-biogas/> [2023-04-15]

Svensson, K. (2017). *Hantering av rötrest vid biogasproduktion*.  
<https://www.energimyndigheten.se/arkiv-for-resultat/Resultat/hantering-av-rotrest-vid-biogasproduktion/> [2023-04-18]

Tian, P., Gong, B., Bi, K., Liu, Y., Ma, J., Wang, X., Ouyang, Z., Cui, X. (2023). Anaerobic Co-Digestion of Pig Manure and Rice Straw: Optimization of Process Parameters for Enhancing Biogas Production and System Stability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 804. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010804>

Van Vlierberghe, C., Chiboubi, A., Carrere, H., Bernet, N., Santa Catalina, G., Frederic, S., Escudie, R. (2022). Improving the storage of cover crops by co-ensiling with different waste types: Effect on fermentation and effluent production. *Waste Management*, 154, 136–145.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.002>

Van Vlierberghe, C., Escudié, R., Bernet, N., Frédéric, S., Carrere, H. (2021). Long term alkaline storage and pretreatment process of cover crops for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 330, 124986. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124986>

Wang, Y., Zhang, Y., Li, J., Lin, J.-G., Zhang, N., Cao, W. (2021). Biogas energy generated from livestock manure in China: Current situation and future trends. *Journal of Environmental Management*, 297, 113324. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113324>

Wartell, B. A., Krumins, V., Alt, J., Kang, K., Schwab, B. J., Fennell, D. E. (2012). Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. *Bioresource Technology*, 112, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.012>

Weiland, K., Alge, K., Mautner, A., Bauer, A., Bismarck, A. (2023). Horse manure as resource for biogas and nanolignocellulosic fibres. *Bioresource Technology*, 372, 128688. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128688>

## Bilagor

Bilaga 1. Mängd och procent av ymp och substrat för fallen under första rötningsexperimentet.

	S <sub>Förh.</sub>		S <sub>Förh. s.</sub>		S <sub>C/N</sub>	
	Mängd [g]	Procent [%]	Mängd [g]	Procent [%]	Mängd [g]	Procent [%]
Kogödsel	7,47	87,9	9,68	96,7	1,59	40,0
Hästgödsel (spån)	0,76	8,99	0,00	0,00	0,00	0,00
Hästgödsel (halm)	0,03	0,36	0,04	0,39	1,23	31,0
Grisgödsel	0,20	2,35	0,26	2,58	0,32	8,00
Matavfall	0,00	0,06	0,01	0,06	0,20	5,00
Ensilage	0,01	0,15	0,02	0,16	0,32	8,00
Avrens	0,01	0,10	0,01	0,11	0,32	8,00
<i>Total mängd substrat</i>	<i>8,49</i>	<i>100</i>	<i>10,0</i>	<i>100</i>	<i>3,98</i>	<i>100</i>
Mängd vatten	337	-	336	-	341	-
Mängd ymp	55,0	-	54,5	-	54,8	-

Bilaga 2. Mängd och procent av ymp och substrat för fallen under andra rötningsexperimentet.

	S <sub>C/N B</sub>		S <sub>C/N -a.j.</sub>		S <sub>Förh. HG</sub>	
	Mängd [g]	Procent [%]	Mängd [g]	Procent [%]	Mängd [g]	Procent [%]
Kogödsel	1,59	40,0	1,59	40,0	6,74	83,9
Hästgödsel (spån)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hästgödsel (halm)	1,23	31,0	1,23	31,0	1,09	13,6
Grisgödsel	0,32	8,00	0,32	8,00	0,18	2,24
Matavfall	0,20	5,00	0,20	5,00	0,00	0,06
Ensilage	0,32	8,00	0,32	8,00	0,01	0,14
Avrens	0,32	8,00	0,32	8,00	0,01	0,10
<i>Total mängd substrat</i>	<i>3,98</i>	<i>100</i>	<i>3,98</i>	<i>100</i>	<i>8,04</i>	<i>100</i>
Mängd vatten	341	-	341*	-	338	-
Mängd ymp	54,8	-	54,8	-	54,5	-

\*Använder avjoniserat vatten.

Bilaga 3. VS och TS i respektive substrat och ymp innan rötning.

	Första rötning			Andra rötning		
	% TS	% VS <sub>av tot</sub>	% VS <sub>av TS</sub>	% TS	% VS <sub>av tot</sub>	% VS <sub>av TS</sub>
Kogödsel	11,1	10,0	89,9	10,1	9,37	92,6
Hästgödsel (spån)	18,8	17,9	94,9	-	-	-
Hästgödsel (halm)	29,5	24,7	83,8	31,5	29,9	95,1
Grisgödsel	55,9	50,3	90,0	20,7	18,4	88,9
Ensilage	29,8	28,1	94,2	24,7	23,6	95,4
Avrens	80,5	76,0	94,4	38,4	35,5	92,5
Matavfall	25,5	23,6	92,4	31,5	30,3	96,3
Ymp	4,88	3,65	74,7	5,81	4,32	75,9

Bilaga 4. T-test över de olika fallens metangasproduktion.

Fall som jämförs	Resultat (p)	Signifikant skillnad? (0,05<p)
Medelvärde $S_{Förh.}$ – Medelvärde $S_{Förh. s.}$	0,154	Nej
Medelvärde $S_{Förh.}$ – Medelvärde $S_{C/N}$	0,474	Nej
Medelvärde $S_{Förh. s.}$ – Medelvärde $S_{C/N}$	0,445	Nej
Medelvärde $S_{C/N B}$ – Medelvärde $S_{Förh. HG}$	0,016	Ja
Medelvärde $S_{C/N B}$ – Medelvärde $S_{C/N -a.j.}$	0,461	Nej
Medelvärde $S_{C/N -a.j.}$ – Medelvärde $S_{Förh. HG}$	0,077	Nej
Medelvärde $S_{Förh. HG}$ – Medelvärde $S_{Förh.}$	0,213	Nej
Medelvärde $S_{Förh.}$ – Medelvärde $S_{C/N B}$	0,246	Nej
Medelvärde $S_{Förh. s.}$ – Medelvärde $S_{Förh. HG}$	0,008	Ja
$S_{Förh.3} - S_{Förh.2}$	0,505	Nej
$S_{Förh. s.1} - S_{Förh. s.3}$	0,407	Nej
$S_{C/N.2} - S_{C/N.1}$	0,039	Ja
$S_{C/N.2} - S_{C/N.3}$	0,005	Ja
$S_{C/N B.1} - S_{C/N B.3}$	0,301	Nej
$S_{C/N -a.j.1} - S_{C/N -a.j.3}$	0,146	Nej
$S_{Förh. HG.2} - S_{Förh. HG.1}$	0,00005	Ja
$S_{Förh. HG.1} - S_{Förh. HG.3}$	0,938	Nej
$S_{C/N.2} - S_{Förh.1}$	0,032	Ja
$S_{C/N.2} - S_{Förh.3}$	0,044	Ja
$S_{C/N.2} - S_{Förh. s.3}$	0,212	Nej
$S_{Förh.2} - S_{C/N.2}$	0,008	Ja
$S_{Förh.2} - S_{Förh. s.1}$	0,026	Ja
$S_{Förh.2} - S_{Förh. s.2}$	0,054	Nej
$S_{C/N B.3} - S_{C/N -a.j.3}$	0,036	Ja
$S_{C/N B.3} - S_{C/N -a.j.2}$	0,270	Nej
$S_{C/N B.2} - S_{C/N -a.j.3}$	0,143	Nej