

Ökad biogasproduktion från flytgödsel

Bakgrund

Gödsel innehåller organiskt material som till stor del är svårt att omsätta till biogas. Dagens konventionella teknik för gödselrötning behöver effektiviseras eftersom en relativt liten del av dess energiinnehåll utvinns i form av biogas och för att andelen ammoniumkväve (som växterna kan ta upp direkt) inte påtagligt förändras. Eftersom flytgödsel innehåller mycket vatten är det inte ekonomiskt att transportera den längre sträckor och den bör därför rötas på gården. För att göra gödselrötningen på gårdsskala mer kostnadseffektiv måste nya systemlösningar utvecklas som leder till ökad energiproduktion för egenanvändning eller försäljning samt minskat inköp av handelsgödselkväve.

Hypotesen är att det går att öka gasproduktionen från gödsel i en tvåstegsrötning genom att avsevärt förlänga uppehållstiden för den svårömsättbara organiska delen av gödseln i andra steget. Genom att koncentrera den rötade gödseln från första steget kan uppehållstiden förlängas i efterröttningssteget. Sedimentationsteknik i kombination med kalkbehandling kan ge önskad koncentration, öka tillgängligheten för nedbrytning av fibrer och kan utgöra en viktig del i att effektivisera rötningen av flytgödsel.

Den föreslagna konceptlösningen för att från flytgödsel öka biogasproduktionen och kvävemineralsiseringen kan sammanfattas enligt följande:

1. Konventionell rötning av flytgödsel från nötkreatur i det första steget med uppehållstid på ca 20 dagar där lättömsättbar organisk substans omvandlas till biogas.
2. Sedimentation av rötad gödsel. Avskilt sediment och svämtäcke där merparten av den organiskt svårömsättbara substansen återfinns rötas i det andra steget efter CaO tillsats.
3. Rötning i det andra steget med uppehållstid på 50-100 dagar.

Vidare effekten av följande tillsatsmedel studerades: a) tillsats av flockningsmedel till sedimentationsbehållaren för att förbättra avskiljningen av organiskt material till den förtjockade fasen; b) tillsats av kalk till den förtjockade fasen för att öka dess nedbrytbarhet.

Syftet med arbetet är att i laboratorieskala undersöka hur fasset separation genom sedimentering samt behandling av den förtjockade fasen med CaO påverkar a) gasproduktionen och b) nettomineraliseringen av kväve jämfört med rötning i ett konventionellt två-stegsförfarande.

Materialer och metoder

Flytgödsel för rötning och ympning av kontinuerlig rötningsprocess

Den kontinuerliga rötningsprocessen startades med ymp från Plönninge gårdsanläggning som huvudsakligen rötar nötgödsel (95 % nötflytgödsel och 5 % av en blandning av rapskaka, ensilage och mjölrester). Ympens sammansättning visas i Tabell 1.

Den flytnötgödsel som rötades under försöket kom från Mjölsta gård utanför Alunda med 67 mjölkkor. Gårdens foderstat bestod i medel av 9 kg TS av vallensilage, 5 kg spannmålskross och 3,7 kg koncentrat av Unik 72 P BK (foder från Lantmännen). Det anges att användningen av halm som strö är liten [1]. Flytgödselns sammansättning redovias i Tabell 1.

Tabell 1 Ymp och gödsel. Torrsubstans, glödförlust och pH.

Substrat	TS (%)	VS (%)	pH
Ymp	3,62 ± 0,14	2,72 ± 0,10	7,6
Flytgödsel	9,76 ± 0,14	8,0 ± 0,11	7,8

Systembeskrivning med rötning av flytgödsel följt av separation och efterrötning

Flytgödseln rötas i kontinuerlig laboratorierötkammare som kallas Reaktor 1 (Fig. 1). Den rötade gödseln ("Rörest 1" i Fig. 1) användes i steget med

”Sedimentation/kalkförbehandling”. Rötrest 1 silas och det genereras en fast fas (som benämns Sol A) samt en vätskefas (som benämns Liq A). För att avskilja mer organiskt material från Liq A tillförs denna fraktion en polymer för att generera flockor. Därefter silas (nylonnät, ca 0,5 mm porstorlek) Liq A och det genereras ytterligare en fast fas (som benämns Sol B) samt en vätskefas (som benämns Liq B). De förtjockade faserna Sol A och Sol B läggs ihop och genererar fraktionen Sol C. I försöksledet ”Etapp 2” genomförs kontinuerliga röttningsförsök med att efterröta dels Sol C, dels Sol C som kalkbehandlats (denna fraktion kallas efter kalkbehandling för Sol C30) i ”Reaktor 2”, se Fig. 1.

Etapp 2 inkluderar även satsvisa försök dels på den flytgödsel som rötas, dels på alla fraktioner som genereras under Etapp 1 och Etapp 2 för att fastställa fraktionernas metanpotential.

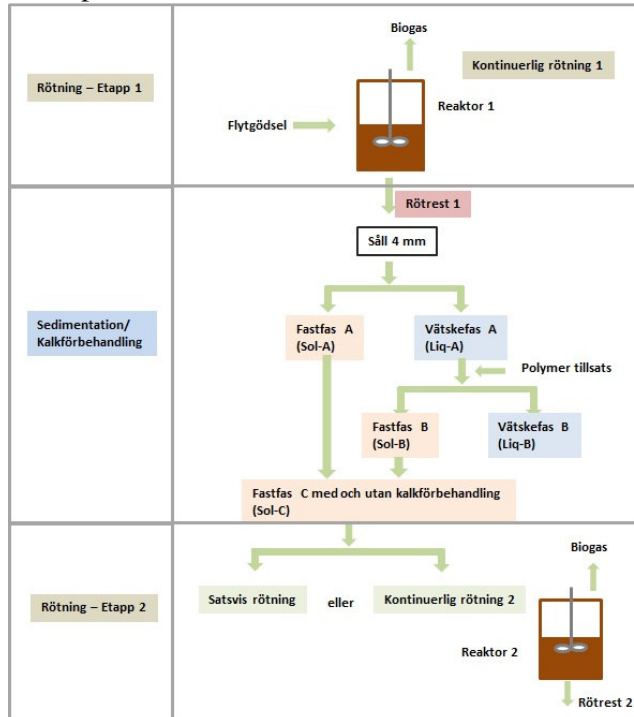


Fig. 1. Schema av genomförandet

Rötning i Etapp 1 och Etapp 2

Två kontinuerliga mesofila (37°C) röttningsprocesser med 35 L volym vardera startades upp med ympen. ”Reaktor 1” (Fig. 1) användes för konventionell rötning av flytgödsel i en totalomblandad process med en uppehållstid (HRT) på 23 dagar. ”Reaktor 2, som är lika stor som ”Reaktor 1”, användes för rötning av Sol C alternativt Sol C30. Processen dokumenterades med avseende på traditionella driftsparametrar [2]. På grund av separationssteget tillförs en mindre mängd material till Reaktor 2 än Reaktor 1 varför uppehållstiden för Reaktor 2 blir 88 dagar. Gasproduktionen för Reaktor 1 och Reaktor 2 normaliseras genom att reducera den uppmätta produktionen med ca 12 %.

Satsvisa utrötningar utfördes i 0,5 L-flaskor vid 37°C med ymp från Reaktor 1 (Fig. 1). Flaskorna fylldes med 300 mL (ymp + substrat + vatten) och belastades med 3,0 g VS/L av respektive substrat samt 6,0 g VS/L ymp. Försöken pågick i 119 dygn. Gasproduktionen beräknades genom att trycket i flaskorna mättes. Trycket konverterades därefter till en gasvolym som normaliseras (1 atm och 0°C). Gasprover togs och analyserades på gaskromatograf (Perkin Elmer ARNEL, Clarus 500; kolonn: 7’ HayeSep N 60/80, 1/8” SF; FID detektor 250°C; bärgas: helium, flöde 31 mL/min; injektortemperatur: 60°C; injektion med hjälp av Headspace sampler Turbo Matrix 110).

Silning, flockning och kalkbehandling

Arbetet med att förtjocka den rötade gödseln från Reaktor 1 var en viktig del av denna studie eftersom denna effektivitet att avskilja kvarvarande organsikt material till en förtjockad fas med hög koncentration är avgörande för efterrötningsstegets förmåga (dvs ”Reaktor 2”) att producera mer biogas. Därför har ett stort antal olika flockningskemikalier med varierande egenskaper testats för att identifiera den flockningskemikalie inklusive doseringsgraden som ger det största utbytet av organiskt material från vätskefasen Liq A (Fig. 1). Den effektivaste flockningskemikalien användes därefter för att generera substratet som efterrötades i Etapp 2. Dessutom testades olika grader av kalkbehandling innan efterrötning i ”Reaktor 2” för att öka nedbrytningsgraden på den organiska substans som erhållits vid förtjockningsstegen.

Vätske- och fastfaserna som erhöles under de olika separationsstegen vägdes upp och analyserades med avseende på TS och VS (Metod SS 02 81813); tot-C (SS-ISO 10694); tot-N och org-N (SS-ISO 13878); NH₄-N (ISO 11732, SIS 02 81 34); tot-P, tot-K, tot-Mg, tot-Ca, tot-Na, tot-S (SS 28311) och metanpotential [3]. Flytgödsel och rötresten inkluderades som referenser i metanpotentialen mätningen.

Metod för att ta fram förtjockad fraktion som efterrötades

På följande sätt behandlades den rötade gödseln från Reaktor 1 (Fig. 1) innan efterrötningen:

- Rötrest från ”Reaktor 1” sållades genom en 4 mm såll för att separera en fraktion med större partiklar (Sol A) från en vätskefas (Liq A).
- Liq A behandlades med den effektivaste polymerlösning (Superfloc C-448, 0,5 %, dos 10 g/kg TS, 250 rpm i 5 min och sen 75 rpm i 30 min), sedimenterades under 4 dygn i rumstemperatur och fasset separerades genom ett nylonnät (ca 0,5 mm porstorlek) och en förtjockad fas (Sol B) liksom en vätskefas (Liq B) bildades.
- Fastfaserna Sol A och Sol B slogs ihop och bildade en fastfas Sol C. I ett försöksled testades hur biogasutbytet påverkades av att kalkbehandla Sol C.

Test av flockningskemikalier

Som ett förförsök testades ett stort antal polymerer för att undersöka dess effektivitet på Liq A (Fig. 1). Polymerer med olika egenskaper erhöles från Kemira och Lyckeby Industrial (Tabell 2). Silad rötad gödsel från Etapp 1 användes vid de olika försöken. Alla Superflocpolymerer är polyakrylamidbaserade som antingen har linjära eller grenade strukturer. Beroende på struktur-längden klassificeras de som låg-, medium och hög molekylvikt och beroende på laddningen som låg-, medium eller hög laddning. Aquaflocpolymerer är stärkelsebaserade polymerer.

Superfloc-C polymerer (1 g) blandades med aceton (2 mL) för att väta polymeren och göra den finare, varefter 198 mL vatten tillsattes. Lösningen fick stå i rumstemperatur i minst 30 minuter för att mogna och slutkoncentrationen blev 0,5 %. Superfloc-SD polymerer förbereddes på samma sätt till en slutkoncentration av 0,5 %, dock utan tillsats av aceton. Aquaflocpolymerer användes i samma form som vid leverans (lösning med 21 % torrsbstans). Polymerlösning (2, 20, 40, 80, 100 eller 200 mL) sattes till en provmängd på 200 mL och blandningen omrördes (150 rpm) under en minut. Därefter filtrerades blandningen genom ett nylonnät (ca 0,5 mm porstorlek). Vätske- och fasta-fasen vägdes upp. Kontroller utan polymer gjordes parallellt. Genererad filtratvolym användes som ett mått på avvattningseffektiviteten av polymererna. Den mest effektiva polymeren användes senare i försöket som beskrivs i Fig. 1.

Test med kalkbehandling för att höja gasutbytet

Fasen Sol C behandlades med kalk i olika koncentrationer (0, 5, 15 och 30 g CaO/kg material) och lagrades därefter i 2 veckor i rumstemperatur. Därefter bestämdes metanpotentialen via satsvis utrötning för dels Sol C (utan kalk), dels med kalktillsats med tre olika koncentrationer.

Tabell 2. Testade katjoniska polymerer. (MW = molecular weight)

		Low charge (5-10%)	Middle charge (30 %)	High charge (40 %)
Linear-Low MW	Superfloc®	C-442	C-446	C-448
Linear-Middle MW	Superfloc®	C-490	C-496	C-498
Linear-High MW	Superfloc®	C-491 HMW	C-496 HMW	C-498 HMW
Förgrenade - SD	Superfloc®-SD	SD-2064		SD-2085
Naturliga	Aquafloc	Aquafloc AC13 (1 300 µkv/g)		Aquafloc AC11 (1 600 µkv/g)

Resultat

Rötning - Etapp 1

Metanproduktion och biogassammansättning från den konventionella kontinuerliga rötningen av flytgödsel visas i Tabell 3. Den kemiska sammansättningen av substratet och rötresten från processen visas i Tabell 4.

Tabell 3. Resultaten från konventionell kontinuerlig rötning av flytgödsel från nötkreatur.

		Reaktor 1
Metanprod.	N-mL CH ₄ /g VS	148
Org.-belast.	g VS/L/d	3,4
HRT	D	23
Biogas	% CH ₄ , % CO ₂	58, 36

Tabell 4. Substrat- och rötrestsammansättning från "Reaktor 1" (se Fig. 1).

	TS %	VS %	T-N g/kg	Org-N g/kg	NH ₄ -N g/kg	P g/kg	K g/kg	Mg g/kg	Ca g/kg	Na g/kg	C g/kg	S g/kg	C/N
Flytgöd.	9,8	8,0	3,8	1,9	1,9	0,6	3,3	0,5	1,3	0,1	39,0	0,4	10
Rötrest 1	5,7	4,2	3,6	1,4	2,1	0,5	3,2	0,5	1,1	0,2	23,3	0,3	7

Separation/Kalkbehandling

Test av flockningskemikalier på vätskefasen Liq A

Bästa resultat erhöles med Superfloc C-448 som gav högt utbyte i ett brett område (ca 10 – 70 g PAM/kg TS) och denna polymer användes vid försöken enligt Fig. 1. Superfloc C-498 gav högsta utbytet vid ca 56 g PAM/kg TS tillsatt polymer inom ett snävt område. Superfloc C-446 var också effektiv inom ett snävt område (56 och 69 g PAM/kg TS). Superfloc C-498 HMW gav en negativ effekt vid högre mängder polymer. Resultaten med Superfloc-C-polymerer med låg laddning, förgrenade (Superfloc SD) och naturliga (Aquafloc) polymerer gav inte signifikativa skillnader jämfört med kontrollen utan polymertillsats (data visas inte).

Separation av rötad flytgödsel

Inledningsvis försöktes det att erhålla en förtjockad fas via en enkel direkt sedimentation av den rötade gödseln från Reaktor 1 (Fig. 1). Det erhöles dock i princip ingen skiktning vid testet varför det beslutades att istället sila rötresten från Reaktor 1 för att separera bort större partiklar följt av tillsats av flockningskemikalie till vätskefasen som erhöles efter silning följt av efterföljande sedimentering. Dessa två separeringssteg genererade en förtjockad fas (Sol C) för efterrötning i "Reaktor 2" (Fig. 1). I ett försöksled kalkbehandlades den förtjockade fasen med 30 g CaO/kg och då erhöles fraktionen Sol C30. Sammansättningen på alla de erhållna fraktionerna vid de olika separationsstegen redovisas i Tabell 5.

För separationseffektivitet användes den traditionella definitionen som är den totala massan av fasta ämnen eller näringsämnen återvunna i den fasta fraktionen i förhållande till den totala mängd fasta ämnen eller näringsämnen [4],

$$E_t = (U \times M_c) / (Q \times S_c)$$

där E_t beskriver separationseffektiviteten; U (kg) mängden av den fasta fraktionen, M_c (g kg^{-1}) koncentrationen av en komponent (t ex TS) i den fasta fraktionen, Q (kg) mängden behandlat prov och S_c (g kg^{-1}) koncentration av komponenten i det behandlade provet. Separationsindex för TS, tot-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ och tot-P visas i Tabell 6.

Tabell 5. Kemisk analys av alla fraktioner efter separation av rötad gödsel inklusive kalkbehandlad.

	TS %	VS %	T-N g/kg	Org-N g/kg	$\text{NH}_4\text{-N}$ g/kg	P g/kg	K g/kg	Mg g/kg	Ca g/kg	Na g/kg	C g/kg	S g/kg	C/N
Sol A	9,7	7,8	3,8	2,2	1,6	0,8	3,9	0,8	2,1	0,2	44,7	0,6	12
Liq A	4,4	2,9	3,8	1,4	2,4	0,5	4,0	0,5	1,1	0,2	21,1	0,3	6
Sol B	8,7	6,9	3,1	1,5	1,6	0,5	3,2	0,5	1,1	0,2	31,6	0,4	10
Liq B	3,7	2,6	3,0	1,1	1,9	0,4	3,4	0,4	0,9	0,2	14,9	0,2	5
Sol C	9,6	7,7	4,1	1,9	2,2	0,5	3,1	0,6	1,5	0,1	39,1	0,4	9
Sol C30	13,9	7,7	3,3	1,9	1,4	0,6	2,9	0,7	17,9	0,1	44,2	0,4	13

Vid ett silningstest (säll med 4 mm hålstorlek) avskiljdes 34, 21, 15 och 34 % av respektive TS, Tot-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ och Tot-P i den fasta fasen (Tabell 6). Den bildade vätskefasen (Liq A) tillfördes polymeren Superfloc C-448 och läts sedan sedimentera. Sedimenteringen var långsam och inte effektiv, troligen pga. Liq A höga TS-halt på 4,4 %. Det tog drygt 4 dygn för att erhålla en tydlig fassetparation och det verkade för lite för att kunna få en effektiv separation av Tot-P. Fassetparationen gjordes via filtrering genom 0,5 mm nät och samlade 20, 8, 7 och 10 % av respektive TS, Tot-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ och Tot-P i fastfasen B (Tabell 6). Om man räknar effekten av alla processer tillsammans, dvs., sällning, polymertillsats, sedimentering och filtrering finner man att 47, 33, 30 och 32 % av respektive TS, tot-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ och tot-P samlades i fasen Sol C.

Tabell 6. Separationssindex (E_t)

	Separeringsprocess	TS	Tot-N	$\text{NH}_4\text{-N}$	Tot-P
Sol A/Rötrest	Sällning 4 mm	0,34	0,21	0,15	0,34
Sol B/Liq-A	Polymer/Sedim./Filtrering	0,20	0,08	0,07	0,10
Sol C/Rötrest	Säll./Polymer/Sedim./Filtr.	0,47	0,33	0,30	0,32

Rötning – etapp 2

Kontinuerliga rötningar

Driftparametrar för efterrötkammaren ”Reaktor 2” (Fig. 1) redovisas i Tabell 7 då den dels rötar en förtjockad fas (Sol C), dels denna förförtjockade fas efter kalkbehandling (Sol C30).

Tabell 7. Resultat från kontinuerlig rötning av avvattnad rötrest, med (Sol C30) och utan (Sol C) förbehandling med kalk.

		Sol C30 (med kalk)	Sol C (utan kalk)
Metanprod.	N-mL CH_4 /g VS	171	110
Org.-belast.	g VS/L/d	0,9	0,9
HRT	d	88	88
Biogas	% CH_4	58	58
	% CO_2	32	38

Tabell 8. Rötrestsammansättning från rötningsetapp 2.

	TS %	VS %	T-N g/kg	Org-N g/kg	$\text{NH}_4\text{-N}$ g/kg	P g/kg	K g/kg	Mg g/kg	Ca g/kg	Na g/kg	C g/kg	S g/kg	C/N
Rötrest C30	8,5	4,3	3,3	1,6	1,7	0,6	3,4	0,7	9,0	0,2	28,0	0,4	8,5
Rötrest C	6,5	5,1	3,8	1,5	2,3	0,6	3,6	0,6	1,4	0,2	26,6	0,4	7,0

Den kemiska sammansättningen på substraten som rötades i "Reaktor 2" redovisas i Tabell 5 och den genererade rötresterna redovisas i Tabell 8.

Satsvisa utrötningar

Metanpotentialen från flytgödsel, rötrest och alla fraktioner som bildades under fassepareringen bestämdes via satsvisa utrötningar, se Tabell 9. Metanpotentialen bestämdes även för den förtjockade fraktionen Sol C utan respektive med kalkbehandling (dos: 5, 15 och 30 g CaO/kg).

Tabell 9. Satsvis utrötning av alla fraktioner. Metanutbyte (N-mL CH₄/g VS) vid 4 st. olika tidpunkter.

	N-mL CH ₄ /g VS				CH ₄
	21 d	33 d	56 d	119 d	%
Flytgöd.	171 ± 2,2	189 ± 2,9	209 ± 3,6	232 ± 3,9	52 ± 4
Rötrest 1	86 ± 2,4	108 ± 2,9	133 ± 3,3	161 ± 3,5	49 ± 3
Sol A	84 ± 1,2	108 ± 2,5	128 ± 4,8	155 ± 3,5	50 ± 4
Sol B	86 ± 1,1	111 ± 1,3	130 ± 0,8	157 ± 2,5	51 ± 4
Sol C	76 ± 7,8	96 ± 6,1	112 ± 5,1	133 ± 3,1	49 ± 4
Sol C5	84 ± 1,7	103 ± 1,6	119 ± 1,4	142 ± 1,5	50 ± 4
Sol C15	94 ± 15,7	108 ± 16,2	121 ± 15,5	137 ± 13	49 ± 5
Sol C30	122 ± 9,0	138 ± 7,9	157 ± 8,6	176 ± 7,1	54 ± 6
Liq A	60 ± 2,9	73 ± 3,3	88 ± 3,7	114 ± 4,7	49 ± 5
Liq B	54 ± 1,5	67 ± 1,3	80 ± 1,9	106 ± 4,8	48 ± 6

Ekonomisk konsekvens vid tillämpning på en biogasanläggning

Beskrivning av koncept med efterrötning

För att belysa de ekonomiska konsekvenserna av uppkomna resultat har det genomförts kalkyler för en biogasanläggning där 5 olika alternativ med efterrötning har jämförts mot ett referenssystem där efterrötning saknas. Alternativen bygger på resultat från denna studie men har i vissa fall modifierats något för att minska kapitalkostnader för efterröttningssteget och därmed förbättra anläggningsekonomi. De studerade alternativen kan beskrivas enligt följande:

Ref: Kalkylerna för detta referenssystem baserar sig på Nordberg m fl. (2010) [5] där det rötas det 35,3 ton gödsel per dag med en TS-halt på 9,2 % (från 350 mjölkkor) i en totalomblandad röttningsprocess med 810 m³ våt volym som drivs vid ca 37 °C, se tabell 11. Uppehållstiden i rötkammaren är 24 dygn. Rötningen av gödsel värderas ge ett mervärde på gödseln motsvarande 2,7 kr/ton rötad gödsel. Biogasen används för kraftvärmeproduktion och producerad värme värderas till drygt 280 000 kr/år. I medel utgör kapitalkostnaderna 12,4% av investeringen och underhållskostanden för röttningsdelen i anläggningen är 2,2 % av investeringen men för kraftvärmeanläggningen är underhållskostanden 0,2 krWh_{el}. VS-reduktionen vid rötningen av flytgödsel antas vara 46 %.

Alt 1: Rötning av flytgödseln enligt "Ref". Efterrötning av hela utflödet från första rötkammaren i en rötkammare som är lika stor. Detta system liknar hur efterrötning sker i tyska biogasanläggningar som rötar energigröda. Gasproduktionen antas vara ca 19 % högre än "Ref"-alternativet varför motorn för kraftvärmeproduktionen måste vara proportionellt större. En större motor antas medföra en högre investering för kraftvärmeanläggningen men också leda till något bättre driftprestanda vilket medför att underhållskostanden antas sjunka något samt att el-verkningsgraden ökar något.

- Alt 2: Rötning av flytgödseln enligt "Ref". Därefter silas det partikulära materialet bort i den rötade gödseln och det genereras en fas med högre koncentration enligt "Sol A" (Tabell 5) som efterrötas i en andra rötkammare med en våt volym på 410 m^3 .
- Alt 3: Rötning av flytgödseln enligt "Ref". Därefter silas det partikulära materialet bort i den rötade gödseln och det genereras en fas med högre koncentration enligt "Sol A" (Tabell 5) och denna fas rötas i en andra rötkammare också med en våt volym på 430 m^3 .
- Alt 4: Rötning av flytgödseln enligt "Ref". Därefter silas det partikulära materialet bort i den rötade gödseln och det genereras en fas med högre koncentration enligt "Sol A" (Tabell 5) och behandlas med 3% CaO och denna fas efterrötas i en rötkammare med en våt volym på 430 m^3 . Kostnaden för CaO antas vara 600 kr/ton.
- Alt 5: Rötning av flytgödseln enligt "Ref". Därefter sker separering enligt Fig. 1 bland annat med hjälp av polymer så att det erhålls en förtjockad koncentration enligt "Sol C" (Tabell 5). Därefter behandlas Sol C med kalk så att en koncentration enligt "Sol C30" erhålls och denna fas efterrötas i en rötkammare med en våt volym på 810 m^3 . Kostnaden för flockningskemikalien antas vara 35 kr/kg.

Tabell 11. Beskrivning av förutsättningar för ekonomisk jämförelsen i Tabell 12.

	Enhet	Ref	Alt 5	Alt 3	Alt 4	Alt 2	Alt 1
Total biogasproduktion	MWh	1907	2479	2214	2285	2145	2279
Biogasproduktion/mer-värde värme/växtnäring	% av referensalternativet	100%	130%	116%	119,8%	112,5%	119,5%
Rötningsteknik, efterrötning	Totalomblandad kontinuerlig	Saknas	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
HRT/Volym-efterrötning	Dagar/ m^3 våt volym	-	75/810	50/530	50/430	50/410	24/810
Avvattning		Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej
Flockning med polymer, förtjockad fas rötas	Dos: 10 g pol/kg TS	Nej	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej
Kalkbehandling	Dos: 3% CaO av våtvikten	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	Nej
VS till efterrötning	% av rötresten VS	-	51%	37%	37%	37%	100%
Elverkningsgrad	% av energi i biogas	33,0%	33,5%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%
Underhållskostnad, kraftvärmeanläggningen	kr/ kWh_{el}	0,20	0,19	0,195	0,195	0,197	0,195

Produktionskostnad för biogas och elektricitet

För att kunna jämföra det ekonomiska resultatet för de fem olika alternativen så presenteras anläggningsekonomi som produktionskostnader för dels rågas där enbart kostnader för rötningensanläggningen inkluderats, dels för producerad elektricitet där även kraftvärmeenshetens kostnader har inkluderats. Denna metodik bygger på hur Brown m.fl. (2010)[6] redovisade ekonomin för den svenska gårdsanläggningen Hagavik. I Tabell 12 redovisas produktionskostnader för alternativen då biogas används för kraftvärmeproduktion:

- utan investeringsstöd eller produktionsrelaterat stöd
- med investeringsstöd på 30 %
- ett produktionsrelaterat stöd på 20 öre per kWh biogas från gödsel.

De kalkylerade produktions-kostnaderna i tabell 12 bygger på att intäkterna från använd värme och rötrest dras ifrån de årliga kostnaderna som är kopplat till rötningen samt att den processvärme som används i biogasanläggningen inte genererar någon kostnad.

Referenssystemet utan efterrötningsteknik kan producera biogas till en kostnad på 21 öre/kWh_{biogas} och elektricitet till kostnaden 117 öre/kWh_{el} utan några bidrag. Med investeringsstöd på 30% sjunker produktionskostnaden för biogas till 14 öre/kWh_{biogas} och elektricitet till kostnaden 86 öre/kWh_{el}. Om det utgår ett produktionsrelaterat på biogas 20 öre/kWh kan elektricitet produceras till 56 öre/kWh_{el} och denna produktionskostnad utgörs i princip enbart av kostnad för kraftvärmeanläggningen.

Tabell 12. Investering och produktionskostnad dels för biogas, dels för elektricitet. Med "Prod. kost" menas produktionskostnad.

	Ref	Alt5	Alt3	Alt4	Alt2	Alt1	Ref	Alt5	Alt3	Alt4	Alt2	Alt1
	Investering (M kr)						Årliga kostnader (kkr/år)					
1:a rötning	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	722	722	722	722	722	722
Efterrötning	0	1,9	1,0	0,8	0,8	1,9	0	230	122	100	94	227
Separation	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0	48	48	48	48	0
Polymer-tillsats	0	0,2	0,2	0	0	0	0	176	176	0	0	0
Kalktillsats	0	0,6	0	0,6	0	0	0	150	0	150	0	0
Kraftvärme	<u>1,0</u>	<u>1,2</u>	<u>1,2</u>	<u>1,2</u>	<u>1,1</u>	<u>1,2</u>	<u>327</u>	<u>422</u>	<u>392</u>	<u>409</u>	<u>380</u>	<u>409</u>
Summa	5,1	8,3	6,8	7,0	6,3	7,2	1049	1748	1459	1429	1244	1358
							Ref	Alt 5	Alt 3	Alt 4	Alt 2	Alt 1
Prod. kost 1	Stöd saknas (öre/kWh _{biogas} // öre/kWh _{el})						21 // 117	37 // 162	32 // 148	28 // 138	24 // 124	25 // 129
Prod. kost 2	30% investeringsstöd (öre/kWh _{biogas} // öre/kWh _{el})						14 // 86	28 // 126	24 // 114	20 // 104	16 // 92	17 // 95
Prod. kost 3	20 öre/kWh i produktionsstöd (öre/kWh _{biogas} // öre/kWh _{el})						1 // 56	17 // 102	12 // 88	8 // 78	4 // 64	5 // 69

Det kan konstateras att:

- I den ekonomiska jämförelsen mellan de olika alternativen beräknas en produktionskostnad. Lägst produktionskostnad behöver inte betyda det bästa årliga ekonomiska utfallet för en anläggningsägare eftersom antalet producerade energienheter under ett år också spelar roll.
- Produktionskostnaderna för biogas/elektricitet blir högre för alla studerade alternativ med efterrötning. För tre av fallen med efterrötning (Alt 1, Alt 2 samt för Alt 4 under förutsättning att kostnaden för CaO inte belastar biogaskalkylen utan bekostas av odlingen av åkermark) är dock skillnaden så liten så att osäkerhet i mätdata och inkonsekvens i gjorda ekonomiska antaganden snabbt kan förändra deras inbördes rangordning vad det gäller produktionskostnader (tabell 12). Om kostanden för CaO allokeras till odlingskalkylen sjunker produktionskostanden för biogas med 3 öre/kWh_{biogas} respektive 86 öre/kWh_{el}.
- Alternativet "Alt 5" där polymer används för separering med efterföljande kalkbehandling ger 30 % högre biogasproduktion än referensalternativet men samtidigt stiger de årliga kostnaderna med ca 70 %. Detta medför att produktionskostnaderna för biogas/elektricitet blir högst i denna jämförelse (tabell 12). Den huvudsakliga orsaken till att detta alternativ gav den högsta produktionskostanden är att polymeren som användes vid försöket inte flockade det organiska materialet i vätskefasen efter silningen speciellt bra varför avskiljningen av organsikt material i detta flockningssteg var låg. Teknisk optimering och utvecklingsinsatser vad det gäller silning och design av polymer för effektiv gödselseparation kan öka separationen av organiskt material, höja koncentrationen på det som ska rötas samt ge lägre årliga kostnader vilket sammantaget kan medföra att produktionskostnaderna för detta alternativ påtagligt kan minskas.

Diskussion

Ökad biogasproduktion och innehåll av ammoniumkväve

Den organiska substans som finns i gödsel och i synnerhet den från nötboskap går långsamt att omvandla till biogas, vilket gör att nedbrytningsgraden vid traditionell CSTR-rötning av nötflytgödsel blir låg liksom gasutbytet.

Baserat på gasutbytena från de två kontinuerliga efterröttningsreaktorerna (Tabell 8) och massbalanskalkyler utgående från analysdata i Tabell 5 och Tabell 9 gällande sammansättning på gödsel, rötrest och fraktioner efter separation har följande beräknats fram:

- Efterrötning av Sol C fraktionen medför en ökad gasproduktion från flytgödseln med 20% jämfört mot om efterrötning saknas (Tabell 10).
- Efterrötning av Sol C30 fraktionen medför en ökad gasproduktion från flytgödseln med 30% jämfört mot om efterrötning saknas.

Rötningssystemet som beskrivs i Fig. 1 genererar två slags rötrest, dels en från separationen som kallas Liq B (Tabell 5), dels en från efterrötkammaren som kallas "Rötrest C" utan kalktillsats samt "Rötrest C30" med kalktillsats (Tabell 8). Det har visat sig vara betydligt svårare att beräkna fram hur mängden ammoniumkväve förändras vid den 2-stegsrötning som genomfördes i detta försök. För att få fram denna förändring detta värde har massbalansberäkningar genomfört för hela rötningssystemet vad det gäller både ammoniumkväve och organiskt bundet kväve. Utgående från detta kan det konstateras att ökningen i ammoniumkväve blev väsentligt mindre än minskningen av organiskt bundet kväve. Orsaken till detta kan förklaras av flera orsaker som analysosäkerhet och ammoniakförluster vid dels rötningen, dels vid silning och flockning med efterföljande kalkbehandling.

Tabell 10. Ökad gasproduktion på grund av efterrötning och ökad ammoniumkvävemängd.

Efterrötning av	Ökad gasproduktion på grund av 2-stegsrötning	Ammonium i flytgödseln	Ökad ammonium på grund av 2-stegsrötning	
			% jämfört mot 1-stegs rötning	g/ton flytgödsel
	% jämfört mot 1-stegs rötning	g/ton flytgödsel	% jämfört mot flytgödselns ursprungliga ammoniuminnehåll	g/ton flytgödsel
Sol C	20	1,88	10-36	0,19-0,67
Sol C30	30	1,88	1-34	0,02-0,64

Baserat dels på den ökade ammoniummängden, dels av den minskade mängden organiskt bundet kväve beräknas denna 2-stegsrötning av flytgödseln generera en ökade ammoniummängden i intervallet:

- 10-36 % då Sol C efterrötades (Tabell 10)
- 1-34 % då Sol C30 efterrötades.

Slutligen kan konstateras att målet med projektet att:

- via efterrötning höja metanproduktionen från flytgödsel med 15-25 % uppnåddes
- öka mängden ammoniumkväve med 10-15 procentenheter via rötning av flytgödseln ej med säkerhet går att fastställa huruvida det uppnåddes eller ej.

Fasseparering med sedimentation och polymer tillsats

Polymertillsats förbättrar torrsustans-, N- och P-separation eftersom flockbildning ökar mängden av material som hålls kvar i den fasta fraktionen. Resultaten av vår polymerscreening visar att polymerer med låg molekylvikt och hög laddning (40%) som Superfloc C-448 gav den bästa separationen på laboratorieskala. Ett högt utbyte i ett brett område eftersträvs i valet av en polymer för att kunna få en robust respons mot variationer i substrat- (t ex. gödsel eller rötad gödsel) och polymerdosering. Polymerer med hög molekylvikt gav en negativ effekt vid högre polymermängder. Resultaten med polymerer med låg laddning, förgrenade och naturliga polymerer gav inte signifikativa skillnader jämfört med

kontrollen utan polymertillsats. Våra separeringsindex för TS, tot-N och NH₄-N ligger i samma område som andra värden som rapporterats i litteraturen [7-9] trots att vårt prov hade en högre % TS. Däremot är separeringsindex för tot-P betydligt lägre än i litteraturen [7-9].

Ekonomi

Den ekonomiska studien visade att för 3 st. av studerade 5 alternativ med efterrötning så var produktionskostanden för biogas och elektricitet i nivå med en biogasanläggning som saknar efterrötningsssteg. Dock gav det efterrötningensalternativet som producerade den största mängden biogas en produktionskostnad för biogas/el som var väsentligt högre jämfört mot en biogas-anläggning som saknar efterrötningsssteg.

Sammanfattningsvis

- Sedimenterings/separationsprocessen mha. polymer var inte effektiv i laboratorieskala.
- Silning av grovt material från den rötade gödseln gav en högre separationsindex än polymertillsatsen.
- Förtjockning och efterrötning av rötad nötflytgödsel gav 20-30% mer metan än traditionell 1-stegsrötning.
- Genomförda beräkningar gällande ammoniummängderna i olika delar av efterrötningssystemet indikerar att det uppstod en hel del ammoniakemissioner kopplat till försöket.
- Efterrötning av den förtjockade fasen med 88 dagars uppehållstid är inte ekonomiskt. Efterrötkammarens volym måste minskas till 50 dagar eller kortare för att få konkurrenskraftiga produktionskostnader på biogas/el.

Referenser

1. Rodhe, L., et al., *Växthusgasemissioner från lager med nötflytgödsel*, in *JTI-rapport Nr 370 Lantbruk & Industri*2008, JTI-Institutet för jordbruks- och miljöteknik: Uppsala.
2. Nordberg, A., et al., *Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid*. *Bioresource Technology*, 2007. **98**(1): p. 104-111.
3. Carlsson, M. and A. Schnürer, *Handbok Metanpotential*, 2011, Svenskt Gastekniskt Center.
4. Svarovsky, L., *Solid-liquid separation processes and technology*, in *Handbook of Powder Technology*, J.C. Williams and T. Allan, Editors. 1985: Bradford, UK.
5. Nordberg, U., M. Edström, and A. Baky, *Rötning på gårdar i Uppsala och Stockholms län. Ett projekt utfört på uppdrag av Länsstyrelserna i Uppsala och Stockholms län.* , 2011.
6. Brown, N., et al., *Utvärdering av gårdsbiogasanläggning med mikroturbin för biogasproduktion*, in *JTI Rapport- Kretslopp & Avfall* 462010.
7. Converse, J.C. and K.G. Karthikeyan, *Nutrient and solids separation of flushed dairy manure by gravity settling*. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004. **20**(4): p. 503-507.
8. Moller, H.B., J.D. Hansen, and C.A.G. Sorensen, *Nutrient recovery by solid-liquid separation and methane productivity of solids*. *Transactions of the Asabe*, 2007. **50**(1): p. 193-200.
9. Sherman, J.J., H.H. Van Horn, and R.A. Nordstedt, *Use of flocculants in dairy wastewaters to remove phosphorus*. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000. **16**(4): p. 445-452.