



Biovetenskap och material  
Jordbruk och livsmedel

## Rötning av fjäderfägödsel med gödselförädling i tillämpad skala

Mats Edström, Erik Sindhøj, Emelie Ljung,  
Stefan Halldorf, Sven Persson, Ulrika Welander,  
Katarina Rugar-Gadd

RISE Rapport : 2018:39

# Rötning av fjäderfägödsel med gödselförädling i tillämpad skala

Mats Edström, Erik Sindhøj, Emelie Ljung,  
Stefan Halldorf, Sven Persson, Ulrika Welander,  
Katarina Rugar-Gadd

# Abstract

## **Digestion of poultry manure with digestate processing in pilot scale tests**

Twenty farmers in the municipality of Mönsterås in southern Sweden are jointly planning to build a large biogas plant. The plant will digest a very high proportion of poultry manure, resulting in significantly greater biogas yield than normally expected, and higher nitrogen contents in the digestate. A major obstacle to realising the biogas plant is controlling digestion operation under high nitrogen levels resulting from the considerable amounts of poultry manure substrate. Poultry manure also contains both heavy and light particles that can cause challenges with poor stability in the digestion process, formation of sediments and crust in digester tanks. The high nitrogen contents together with high phosphorus and solids concentrations will also create difficulties for digestate management and use as fertiliser.

Today solid poultry manure is mainly used as a phosphorus fertiliser, not only due to high concentration of phosphorus but also due to relatively poor utilisation of the nitrogen by crops. However, due to the high concentration of phosphorus, the application rate needed to meet plant needs is lower than modern solid manure spreaders can evenly apply. Over application and inefficient use of nitrogen increases risk of nutrient losses to waters and the environment.

To study these issues for biogas production, Vinnova (Sweden's innovation agency) has supported this research project in applied digestion and digestate processing.

The project contained the following components: i) 6 months digestion tests with prospective substrates in a pilot-plant with 5 m<sup>3</sup> active digesting volume, provided with mixers and pumps commonly used in full-scale plants, ii) laboratory tests to determine biogas potential for feedstocks, and to determine the potential for increased gas production by post-digestion, iii) applied trials of separating and concentrating the digestate with centrifuge followed by industrial evaporation of the liquid phase, iv) analysis of the nutrient value and the function of the concentrated fertilizer in organic farming.

The biological and technical operational performance in the pilot test was evaluated in a complete stirred tank reactor at mesophilic temperature during co-digestion of poultry manure, liquid manure and glycerol. The poultry manure contributed with approx. 70% of dry matter in the substrate mixture and 80% of the nitrogen and phosphorus. The digestion process was stable with NH<sub>4</sub>-N levels close to 6 g/l. To control hydrogen sulphide in the biogas to approx. 100 ppm, ferric chloride was added to the digester. Volumetric methane production reached 1,1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ m<sup>3</sup> digester and day. Significant formation of sediment occurred in both digester and in pipes, however, no crust formation was observed in the digester. The outflow of ammonia from the digester by the digestate was 3.7 times higher than the ammonia inflow by the substrate mixture. Thirteen tonnes of digestate was produced during the pilot test. The digestate was separated with a decanter centrifuge generating a solid fraction corresponding to 23% of digestate weight and approx. 70% of the phosphorus in the digestate. Sulfuric acid was added to the liquid fraction generated by the centrifuge before evaporation to stabilize the ammonium nitrogen. Industrial evaporation of the liquid fraction produced a

concentrate corresponding to 23% of digestate weight and containing approx. 70% of the ammonium nitrogen in the digestate.

The pilot test generated four different fertilisers, (digestate, solid fraction, liquid fraction and concentrate) each with very different physical and chemical properties. Digestate processing increased the N/P ration of the liquid fraction and concentrate allowing more balanced N and P supply to crop demand, reducing the risk of nutrient losses to waters but also increasing the resource use efficiency of the plant nutrients. Processing was also successful at concentrating the two of the fertilisers, enabling cost effective long-distance transport for use in areas with low animal density and a need for the soil amendment properties of from manure.

These project results have contributed to plans for a full-scale plant by developing the basis of design and the credibility for implementation, resulting in an investment grant and the formation of a new economically stronger company. Based on the results from the project, the estimated production of biogas in a full-scale plant is 70 GWh /year for renewable automotive fuels. Post-digestion of the digestate with 10 days retention time can increase biogas production with an extra 3 GWh/year (4%). The solid and liquid products can fertilise 12 000 ha/year of organic cultivation with nitrogen and up to 20 000 up to ha/year with phosphorus.

Key words: Biogas, digestion, co-digestion, post digestion, poultry manure, chicken manure, digestate, processing, centrifugation, evaporation; rötning, samrötning, efterrötning, höns gödsel, fjäderfägödsel, kyckling gödsel, biogödsel, produktifiering, separation, centrifugering, indunstning

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport : 2018:39

ISBN: 978-91-88695-78-9

Uppsala

# Innehåll

<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>Innehåll</b> .....	<b>3</b>
<b>Förord</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Bakgrund</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Mål</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Metod</b> .....	<b>9</b>
3.1 Inventering av substrat för rötning .....	9
3.2 Analyser .....	11
3.3 Tillämpade försök .....	11
3.3.1 Beskrivning av pilotanläggning för rötningförsök.....	11
3.3.2 Ympning, substrathantering och drift.....	12
3.3.3 Centrifugering av rötrest .....	15
3.3.4 Indunstning av tunnfas från centrifug .....	16
3.4 Rötningförsök i laboratorieskala.....	17
3.4.1 Efterrötning i CSTR.....	17
3.4.2 Satsvisa utrötningar .....	17
3.4.3 Bestämning av restgaspotential .....	18
3.5 Fysikaliska egenskaper .....	18
3.5.1 Viskositet .....	18
3.5.2 Partikelstorlek .....	19
3.6 Bedömning av förädlade rötrestens värde.....	19
3.6.1 Växtnäringsvärde .....	19
<b>4 Resultat från empiriska försök</b> .....	<b>21</b>
4.1 AP 1 – Pilotförsök .....	21
4.1.1 Rötningprocessen .....	21
4.1.2 Tekniska erfarenheter .....	23
4.1.3 Fysikaliska erfarenheter .....	25
4.2 AP 2 - Produktion av supergödsel .....	26
4.2.1 Centrifugering .....	26
4.2.2 Indunstning .....	28
4.3 AP 3 - Laboratiestudie.....	29
4.3.1 Kontinuerlig efterrötning .....	29
4.3.2 Bestämning av restgaspotential .....	31
4.3.3 Bestämning av biogaspotential .....	31
<b>5 Tolknings av resultaten</b> .....	<b>32</b>

5.1	Massbalans och växtnäringsfördelning .....	32
5.2	Växtnäringsinnehåll.....	32
5.3	Värmebehov för uppvärmning .....	33
5.4	Elbehov för indunstning .....	33
5.5	AP 4 - Analys av den förädlade biogödselns växtnäringsvärde och funktion .	34
5.5.1	Växtnäringsvärde .....	34
5.5.2	Bedömning av kväveeffekt.....	36
5.5.3	Lagring.....	37
5.5.4	Spridningsteknik .....	37
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>39</b>
6.1	Rötning .....	39
6.2	Förädling av rötrest .....	41
6.3	Biogödselvärdering.....	41
6.4	Lokalt och regionalt perspektiv .....	42
	<b>Referenser .....</b>	<b>44</b>
	<b>Bilaga 1: AP1.....</b>	<b>46</b>
	<b>Bilaga 2: AP2 .....</b>	<b>49</b>
	<b>Bilaga 3: AP4 .....</b>	<b>53</b>
	<b>Förrådsgödsling.....</b>	<b>53</b>

# Förord

Ett tjugotal lantbrukare i Mönsterås kommun planerar för att bygga en gemensam biogasanläggning, som kan bli den största i sitt slag i Sverige. Anläggningen skall röta en mycket hög andel hönsgödsel som ger betydligt högre kvävenivåer och mer biogas än vad som är brukligt i biogasprocesser. För att konkretisera detta har de tagit hjälp av akademien för att få säkrare kunskapsunderlag för sin investering då andelen fjäderfä-gödsel i den planerade biogasprocessen utmanar nuvarande erfarenheter inom biogasbranschen. Dessutom kräver den tänkta produktionen av högvärdig biogödsel att nya processtekniker för avvattning och koncentrerings av rötresten testas. Projektet består av följande komponenter: AP1. Pilotförsök med rötning av de tilltänkta substraten; AP2. Tillämpade försök med separation och koncentrerings av rötrest; AP3. Analys av den förädlade biogödselns växtnäringsvärde och funktion som gödsel i ekologisk växtodling, och; AP4. Laboratoriestudier som fastställer substratens biogaspotential samt möjligheten att utvinna mer biogas via efterrötning.

Medverkande i projektet från:

- RISE, enheten Jordbruk och livsmedel, var Anders Ringmar (teknikerstöd under AP1 och AP2), Emelie Ljung (administration och koordinering mellan partners och aktiviteter inom AP1-AP4), Erik Sindhøj (ansvarig för AP4 samt medverkan under centrifugering och indunstning av rötrest under AP2), Johnny Ascue (genomfört analyser för driftövervakning av röttningsprocesser under AP1 och koordinering av metodik för rötning i laboratorieskala med Linnéuniversitetet liksom genomförande av kontinuerlig efterrötning under AP3) och Mats Edström (ansvarig för AP1 samt medverkan under AP2 med indunstning, genomförande av mass- och energibalanskalkyler, medverkan i AP3 och AP 4 samt huvudansvarig för utformning av denna rapport). RISE var projektkoordinator.
- Linnéuniversitetet var Katarina Rupar-Gadd (medverkade i genomförandet av AP3) och Ulrika Welander (ansvarig för AP3 och medverkade vid genomförandet av seminarium)
- Mönsterås Biogas var Stefan Halldorf (deltog under AP1 med drift och tillsyn av den mobila pilotanläggningen, ansvarig för AP2, deltog i värderingen av olika gödselmedel i AP4 samt som en representant för Mönsterås Biogas).
- Promill Teknik AB var Sven Persson (deltog under AP1 med drift och tillsyn av den mobila pilotanläggningen, genomförandet och tolkning av processdata under AP2 samt som en representant för Mönsterås Biogas).

Vi vill tacka alla deltagande i projektet liksom alla de personer som kommit för att lyssna på de seminarier vi deltagit i. Vi vill även tacka Nina Nilsson på Greppa Näringen, Länsstyrelsen Kalmar län, som medverkat genom att anordna seminarium för att sprida projektets resultat. Ett stort tack till Vinnova vars finansiering gjorde det möjligt att genomföra detta projekt. Till sist vill vi rikta ett stort tack till biogasanläggningen More Biogas i Läckeby strax norr om Kalmar, för att vi fick tillgång till era lokaler, både vid försöksarbetet och vid det seminarium som anordnades, och för att ni upplät en uppställningsplats för den mobila biogasanläggningen, dekantercentrifugen och indunstaren samt gav oss tillgång till lastmaskin. Ett särskilt tack till den personal som ryckte ut för att åtgärda både larm från piloten liksom vid valvbildningar i fickan för fastgödselblandningen, och som även plogade snö kring uppställningsplatserna.

# Sammanfattning

Ett tjugotal lantbrukare i Mönsterås kommun planerar för att bygga en stor biogas-anläggning som kommer att ha fastgödsel från höns som huvudsubstrat. Den gemensamma biogasanläggning kan bli den största i sitt slag i Sverige, med en biogasproduktion på ca 70 GWh biogas/år för produktion av drivmedel. Den genererade rötresten kan kväveförsörja ca 12 000 ha/år växtodling och fosforförsörja ca 20 000 ha/år. Den rötade gödseln bidrar i princip till all växtnäring i rötresten, där fjäderfägödseln kommer att bidra med ca 80 % av rötrestens innehåll av kväve och fosfor. Ett hinder för att realisera denna anläggning är att det idag saknas erfarenhet från praktisk drift av rötningsanläggningar med betydande inblandning av fjäderfägödsel. Fjäderfägödsel är både ett fosfor- och kväverikt substrat, och innehåller dessutom både tunga och lätta partiklar som riskerar att bilda sediment och svämtäcken i rötammaren. Idag betraktas fjäderfägödsel framför allt som ett fosforgödselmedel eftersom huvuddelen av kvävet inte är direkt upptagbart av växter, men rötning av fjäderfägödsel ökar andelen direktverkanande kväve. För att optimera hantering, spridning och utnyttjande av kväve och fosfor i fjäderfägödsel är det önskvärt att processa denna gödsel för att generera fyra stycken gödselmedel med olika kväve- och fosforkvot. För att kunna studera dessa frågeställningar och bredda gödselbasen för rötning har Vinnova, under 2016-2018, finansierat denna tillämpade studie.

Under ett tillämpat försök genomfördes rötning i pilotskala av kväverik höns gödsel som huvudsubstrat. Röttningsprocessen gick att driva stabilt vid en ammoniumkvävehalt på närmare 6 g/l inom det mesofila temperaturområdet i en totalomblandad rötammare med volumetrisk metanproduktion som uppgick till 1,1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> slamvolym & dag. Järnklorid tillfördes rötammaren för att hålla biogasens innehåll av svavelväte vid ca 100 ppm. För att hålla ammoniumhalten vid angiven nivå tillfördes vatten motsvarande halva inflödet in i rötammaren, för att späda ner kvävet till denna nivå. Efter rötningen av substratblandningen ökade dess ammoniuminnehåll med 3,7 gånger.

Under pilotförsöket producerades ca 13 m<sup>3</sup> rötrest som sparades och lagrades 4–8 månader innan den förädlades i två steg till två olika gödselmedel. I första steget genomfördes fassetparation med en dekantercentrifug följt av indunstning av surgjord tunnfas. Baserat på dessa försök beräknas fassetpareringen kunna generera ett fast gödselmedel vars vikt motsvarar 23 % av i röttningsprocessen producerad rötrest. Det fasta gödselmedlets innehåll av fosfor utgör dryga 70 % av rötrestens fosforinnehåll. Vidare beräknas indunstningen kunna generera ett uppkoncentrerat flytande gödselmedel vars vikt motsvarar 20 % av i röttningsprocessen producerad rötrest. Det flytande gödselmedlets innehåll av ammoniumkvävet utgör dryga 70 % av rötrestens ammoniuminnehåll.

Det producerade koncentratgödselmedlet liksom tunnfasgödselmedlet hade en hög andel lättillgängligt kväve, vilket är en viktig delförutsättning för att uppnå höga skördar vid växtodling. Gödselmedel från Mönsterås Biogas planerade biogasanläggning kan i framtiden bidra till att jordbruket i Kalmar län med omnejd kan gå mot en hållbar intensifiering av livsmedelsproduktionen.



# 1 Bakgrund

Rötning av stallgödsel är den mest beprövade tekniken för energiutvinning av dess kemiska energiinnehåll. Tekniken erbjuder multipla fördelar som förnybar energiproduktion, förbättrad tillgänglighet hos gödselns kväveinnehåll och ett hjälpmedel för att minska miljöskadliga emissioner (Tybirk m.fl., 2013). Den teoretiska potentialen för biogasproduktion från stallgödsel i Östersjöregionen har beräknats till 38–74 TWh/år varav ca 50 % bedöms vara teknoekonomiskt möjligt att uppnå (Luostarinen, 2013a). Av denna potential bedöms den energirikare men tekniskt och biologiskt mer svårrotade fastgödseln utgöra ca 75 % medan resten har sitt ursprung i den energifattigare men mer lättrotade flytgödseln. Den stallgödselrötning som förekommer idag sker med hjälp av den väl beprövade kontinuerliga totalomblandade röttningsprocessen (s.k. CSTR-teknik) och är i stort sett begränsad till enbart flytgödsel som substrat (Luostarinen, 2013a). Effektiv omrörning av en CSTR-rötkammare för att säkerställa att den är totalomblandad och därmed kontrollerbar är en nyckelfunktion i biogasanläggningar (Wellinger, 2013).

År 2016 rötades 880 000 ton gödsel i Sverige (ES 2017:07) vilket utgör dryga 40 % av alla substrat som rötas i samröttnings- och gårdsbaserade anläggningar. Trots detta är det bara 3,5 % av den totala svenska gödselmängden som utnyttjas till biogasproduktion, och då nästan uteslutande flytgödsel. Den gödsel som rötas idag bedöms generera ca 110 GWh/år biogas, vilket utgör ca 12 % av gasproduktionen från samröttnings- och gårdsbaserade anläggningarna (ES 2017:07).

Särskilt fastgödsel från fjäderfä utgör en outnyttjad resurs för rötning, beroende på dess mycket höga innehåll av kväve, vilket sätter biologiska begränsningar. Fjäderfägödsel har dessutom ett helt annat växtnäringvärde än annan stallgödsel, vilket gör att en biogasanläggning normalt sett får vara beredd att betala marknadspriset för denna gödsel. Det höga innehållet av fosfor gör också att gårdar med biogasanläggningar som redan innan har ont om spridningsareal, kan ha svårt att ta in sådan gödsel. En fjärde begränsning är också att hönsköts gödsel innehåller en hel del kalk, vilket gjort att flera biogasanläggningar gått ifrån att ta in det. Detta gäller dock höns-, inte kycklinggödsel.

Flytgödsel är ett energifattigt substrat vars biogasproduktion oftast är 15–25 m<sup>3</sup>/ton flytgödsel. Med denna låga förmåga att producera gas är det i princip omöjligt att uppnå en volymetrisk gasproduktion vid flytgödselrötning som överstiger 1 m<sup>3</sup> biogas/m<sup>3</sup> rötkammarvolym och dag. Christiansen m.fl. (2007) har studerat olika strategier för att förbättra anläggningsekonomi vid gödselrötning. Den lågteknologiska metod som visade sig vara den effektivaste för att förbättra ekonomin, var att tillföra energirika substrat till flytgödseln. Denna driftstrategi leder till dels ökad biogasproduktion vid anläggningen, dels förbättrade energibalanser. Detta har också verifierats av (Hjort-Gregersen, 1998) som visade på att danska biogasanläggningarna behöver uppnå en biogasproduktion på ca 35 m<sup>3</sup> biogas/ton substratblandning för att det skall gå att uppnå god ekonomi. Inom branschen råder det stor konkurrens om de energirikaste råvarorna för rötning. Fjäderfägödsel är dock en outnyttjad råvara som ger ca 10 ggr högre gasproduktion än flytgödsel per våtviktsenhet och utgör därför ett potentiellt intressant substrat för effektivisering av gödselröttningsprocesser. Vidare, vid gödsling med fjäderfägödsel till spannmålsgrödor tas bara 30–40 % av kvävet upp av grödan (Delin, 2008). Dessutom är det vanligt att de arealer som gödslas med stallgödsel får för höga fosforgivor i jämförelse mot grödornas behov. För att minska jordbrukets bidrag till

samhällets totala miljöbelastning är det högprioriterat att minska stallgödselns läckage av växtnäring till vattendrag och hav. Totalt bidrar svenskt jordbruk med ca 40 % av de svenska utsläppen av kväve och fosfor till Östersjön (SCB m.fl., 2012). Genom rötning av fjäderfägödsel kan andelen ammonium-kväve mer än fördubblas (Edström m.fl., 2013a), vilket medför att grödorna effektivare kan ta upp dess kväveinnehåll och därmed mindre N-läckage.

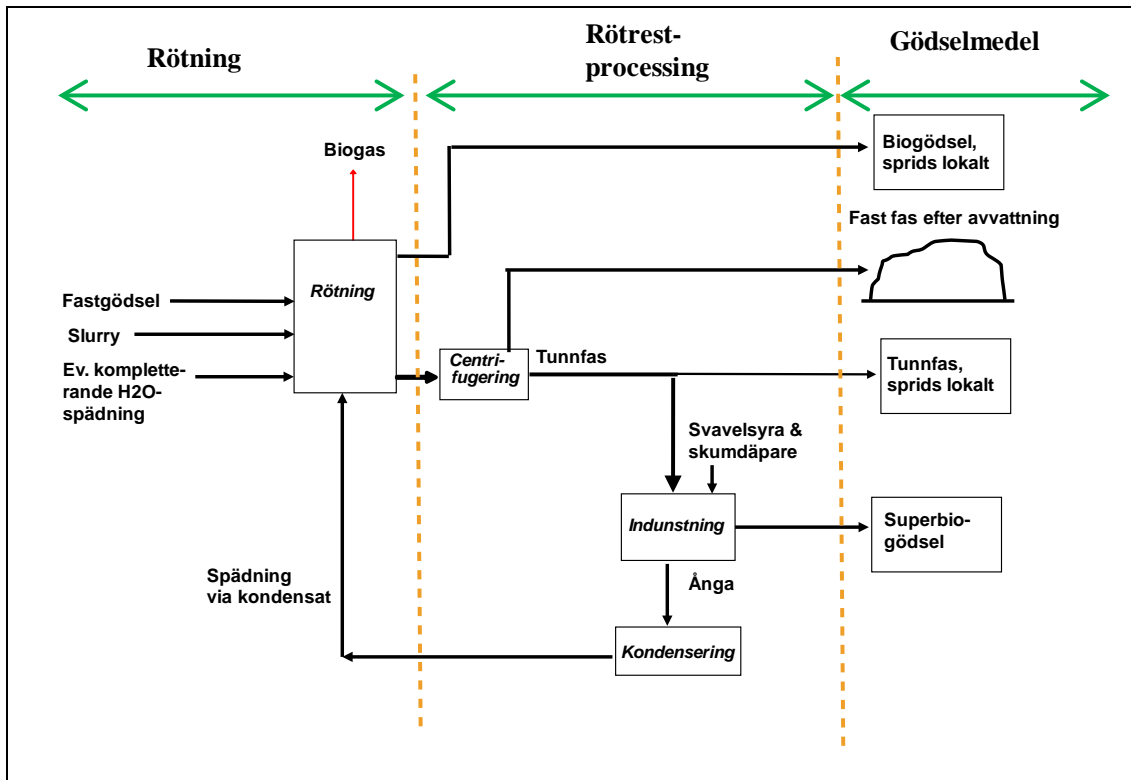
Fastgödsel från fjäderfägödsel karakteriseras specifikt av höga TS-halter (25–65 %) och är kväverik (N-innehåll: 12–35 g N/kg gödsel). Vid rötning av kväverika material sker nettomineralisering av organiskt kväve till ammoniumkväve (NH<sub>4</sub>-N), vilket kan leda till hämning av biogasprocessen vid nivåer över ca 3 g NH<sub>4</sub>-N/L (t.ex. Schnürer & Nordberg, 2008). Ett sätt att undvika hämning är att späda substratet med vatten, men det leder till större volymer rötrest att hantera, vilket ökar kostnaderna.

Den gödselrötning som sker i gårdsskala, där gasen nyttjas för kraftvärmeproduktion, går generellt med ekonomisk förlust (Jansson, 2014). Genom att samröta energirik fjäderfägödsel med energifattig flytgödsel i en stor anläggning uppnås tre kriterier för bättre ekonomi; 1) väsentligt högre gasproduktion per volymenhet rötchammare än då bara flytgödsel röts, 2) skalfördelar gällande investerings- och driftkostnad, 3) stor gasproduktion vilket möjliggör avsättning till en drivmedelsmarknad som genererar väsentligt högre intäkter än vad som kan uppnås med kraftvärmeproduktion.

Ett tjugotal lantbrukare i Mönsterås kommun samarbetar i det nystartade bolaget Mönsterås Biogas, som kommer ha fastgödsel från höns som huvudsubstrat. De planerar att bygga en gemensam biogasanläggning som kan bli den största i sitt slag i Sverige med biogasproduktion på ca 70 GWh biogas/år för produktion av drivmedel. Ungefär 75 % av producerad gas från den planerade anläggningen kommer från stallgödsel och den genererade rötresten kan kväveförsörja ca 12 000 ha växtodling. Den rötade gödseln bidrar i princip till all växtnäring i rötresten där fjäderfägödseln kommer att bidra med ca 80 % av rötrestens innehåll av kväve och fosfor. Producerad rötrest kommer efterbehandlas för att producera flera olika gödselmedel, se figur 1:1. Första behandlingssteget är fassettering via en centrifugering och den genererar ett fast gödselmedel. Delar av vätskefasen kommer att behandlas via indunstning för att producera ett växtnäringskoncentrat som Mönsterås Biogas kallar superbogödsel. Orsaken till att fassettering kombineras med indunstning är att värmeövergångens effektivitet i indunstaren är beroende av viskositeten för slurryn som skall koncentreras. I och med att vatten förångas under indunstningen ökar viskositeten kontinuerligt och det blir svårare att nå höga koncentreringsgrader om ursprungsslurryn som ska indunstas har en hög viskositet. I synnerhet fibrer, men även mindre partiklar, i rötrest bidrar till dess viskositet varför indunstning av rötrest har partikelseparation, via mekanisk fassettering t.ex. via centrifugering, som försteg.

Rötrest innehåller relativt låga koncentrationer av växtnäring vilket gör att transport-, lagrings- och spridningskostnad snabbt överstiger dess värde (Dahlberg, 2010). För närvarande hanteras rötrest på samma sätt som den väletablerade hanteringen av flytgödsel. Vid större biogasanläggningar är kostnaderna för rötresthanteringen betydande, varför de ofta efterfrågar koncentreringsstekniker för rötrest. Det finns flera teknologier som används för att koncentrera substanser som finns i vätskor, som i viss omfattning också testats vid biogasanläggningar för att koncentrera upp rötrestens växtnäring. Processutrustningen för dessa teknologier är dock sofistikerad med stort

behov av energi och/eller kemikalier vilket leder till hög kostnad för koncentrerings (Drosg m.fl. 2015). Ett exempel på detta är indunstning som är en väletablerad teknik är bl.a. vid sockerbruk, mejerier och pappersmassabruk. Denna teknologi används även i viss omfattning vid biogasanläggningar (Tamm m.fl., 2018).



Figur 1:1 Schematisk beskrivning av den biogasanläggning som Mönsterås Biogas planerar att uppföra.

## 2 Mål

Det övergripande målet med projektet är att testa, verifiera och optimera ny teknik och biologi som möjliggör storskalig rötning av fosfor- och kväverika stallgödselslag inklusive dess rötresthantering. Projektet var nödvändigt att genomföra i denna skala för att generera tillräckliga mängder rötrest, så att vidareförädlingen av rötresten kunde ske i full skala (centrifugering) eller pilotskala (indunstning).

## 3 Metod

### 3.1 Inventering av substrat för rötning

Mönsterås Biogas har i ett förprojekt genomfört en inventering och karakterisering av tillgängliga stallgödselmängder i Mönsteråsregionen, vilket utgör basen till den substratblandning som ska rötas i en produktionsanläggning för framställning av biogas till drivmedel och olika gödselmedel. Dessutom har det adderats ytterligare ett energirikt

substrat, spädvatten, för att göra substratblandningen rötbar och tillsatsmedlet järnklorid för att reducera svavelväteinnehållet både i biogasen men även i rötmassan som finns i rötkammaren. Under försöksrötningen har målet varit att röta en substratblandning vars våtviktsfördelning stämmer överens med redovisad sammansättning i tabell 3:1. Huvudsubstratet i denna blandning är hönsgödsel som bidrar med dryga 60 % av den VS som rötades och närmare 80 % av den producerade rötrestens innehåll av kväve respektive fosfor. Stallgödselfraktionerna bidrar tillsammans med ca 85 % av den VS som rötades och 100 % av växtnäringen.

Tabell 3:1. Beskrivning av hur delsubstraten bidrar till den totala substratblandning som Biogas Mönsterås planerar att röta i en framtida produktionsanläggning, vars beräknade kemiska sammansättning redovisas i tabell 3:2. Enheterna för: Våtvikt, vikt-% av totala substratblandningen; TS, % av totala substratblandningens torrsbstansinnehåll; VS, % av totala substratblandningens innehåll av organiskt material; N, % av totala substratblandningens kväveinnehåll; P, % av totala substratblandningens fosforinnehåll.

	Våtvikt	TS	VS	N	P
Nötflytgödsel	18,0%	11,55%	11,58%	10,89%	9,47%
Djupströgödsel, nöt	1,4%	3,33%	3,37%	2,09%	2,16%
Svinflytgödsel	2,0%	1,36%	1,36%	1,47%	1,49%
Djupströ, svin	0,2%	0,30%	0,28%	0,14%	0,25%
Kycklinggödsel	1,2%	5,73%	6,03%	4,49%	8,42%
Hönsgödsel	23,6%	64,30%	61,90%	80,92%	78,21%
Glycerol	1,7%	12,86%	15,47%	0,00%	0,00%
Vatten	51,6%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Järnklorid	0,3%	0,56%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>Summa</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Substratblandningen som den planerade biogasanläggningen kommer att röta beräknas ha en TS-halt på 13,6 % (inklusive vattenspädning) och ett innehåll av totalkväve på 7,5 kg/ton, se tabell 3:2.

Tabell 3:2. Beräknad kemisk sammansättning på den totala substratblandning som Biogas Mönsterås planerar att röta i en framtida produktionsanläggning.

		Enhet
TS-halt	13,6	% av våtvikt
VS-halt	83,1	% av TS
Innehåll av totalkväve	7,5	kg/ton
Andel ammoniumkväve	20	% av totalkvävet
Fosforinnehåll	1,3	kg/ton

## 3.2 Analyser

Om inget annat sägs i detta kapitel har följande analysmetoder använts för att följa upp rötningsprocesser och för att karakterisera substrat, ymp och rötrest:

- Karakterisering av substrat och rötrest har genomförts via standardanalyser av laboratoriet Agri Lab AB (stallgödselpaket).
- Uppföljning av rötningsprocessernas TS, VS, totalkväve och NH<sub>4</sub>-N har analyserats enligt APHA 1995.
- pH med pH-meter Jenway 3510.
- Under laboratorieförsöket med efterrötning analyserades biogasens innehåll av metan, koldioxid och svavelväte med instrumentet BIOGAS 5000 från Geotech en gång per vecka. Vidare analyserades dagligen biogasens CO<sub>2</sub>-innehåll med en Einhorn's fermentationssackarometer med 7 M natriumhydroxid.
- VFA i röt-kammaren och i substrat analyserades enligt Schnürer m.fl., (2008).
- Kalibrering av laboratorierötkammarens kontinuerliga gasmätare, för kontinuerlig efterrötning, genomfördes genom att producerad biogas samlas upp i en påse efter mätarpassage. Volymen gas i påsen mäts därefter via en trumgasmätare från Ritter med benämningen TG05/5.
- Gasproduktionen normaliserades (0 °C, 1 atm). Den normaliserade gasvolymen betecknas med ett N följt av ett volymmått i denna rapport.

## 3.3 Tillämpade försök

### 3.3.1 Beskrivning av pilotanläggning för rötningsförsök

Försöket genomförs i en mobil fjärrövervakad pilotanläggning, som ägs av RISE. Under försöket var anläggningen lokaliserad till More Biogasanläggning i Läckeby strax norr om Kalmar. Pilotanläggningens huvudkomponenter är:

- Röt-kammare med aktiva volymen 5 m<sup>3</sup> med reaktorgeometri H/B (förhållande mellan vätskepelarens höjd och röt-kammarens diameter) på 0,64/1. Röt-kammarens diameter är 2,12 meter. Röt-kammarens vikt mäts med lastceller från Mettler-Toledo AB med benämningen typ 0745A. Omrörning sker med en toppmonterad långsamt roterande propelleromrörare med dubbla impellrar från Scanpump/SCABA. Mellan elmotorn och omröraraxeln sitter en växellåda som ger rotationshastigheten 117 varv/minut vid 50 Hz. Elmotorns rotationshastighet styrs med frekvensomriktare. Benämning på omröraren är 40VVPT-Laa och den har en övre impeller som har diametern 500 mm (typ 2SHP1 med bladtjocklek på 4 mm, impeller monterad på ca 1270 mm över botten på röt-kammaren) och en undre impeller med diametern 600 mm (typ 3SHP1 med bladtjocklek på 5 mm, impeller monterad på ca 500 mm över botten på röt-kammaren).
- För att transportera substratblandningar in i röt-kammaren och pumpa ut rötrest från röt-kammaren används Netzsch excenterskruvpumpar modell Nemo NM053BY02S12B som är försedda med frekvensomriktare och har DN80 röranslutningar.

- En lagertank med kapacitet att lagra ca 1,4 m<sup>3</sup> flytande substrat. Lagertankens vikt mäts också med lastceller från Mettler-Toledo AB med benämningen typ 0745A. Tanken har också en toppmonterad långsamt roterande propelleromrörare med dubbla impellrar från Scanpump/SCABA. Den flytande substratblandning som lagrades i denna lagertank under försöket kallas i denna rapport för slurry.
- En blandningstank som utgörs av en st. horisontell paddelomblandare från Petsmo med 300 liters volym för att blanda fasta och flytande fraktioner pumpbar fraktion. Blandartankens vikt mäts också med lastceller från Mettler-Toledo AB med benämningen typ 0745A.
- En sönderdelningsutrustning med benämningen Taskmaster från Franklin-Miller monterad på röret mellan lagertank och blandningstank. Utrustningen är också försedd med frekvensomriktare.
- En ficka med bottenkruv för att lagra fasta substrat med ungefärlig volym på 400 liter. Skruvfickans vikt mäts med lastceller från VETEK med beteckningen VZ563YS. Den fastgödselblandning som lagrades i fickan under försöket kallas i denna rapport för fastgödsel.
- Volymflödet av producerad biogas mäts med en fluidistoroscillator utrustning levererad av Fluid Inventor med benämningen 005GD025/3. I denna rapport redovisas enbart normaliserad gasproduktion. Denna produktion har beräknats fram genom att multiplicera uppmätt rågasproduktion med faktorn 93 %.
- Biogasens kvalitet mäts med en Biolyzer SSM 6000 Classic som mäter förekomst av CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S och O<sub>2</sub>.
- Styrning och övervakning av pilotanläggningen genomfördes med en PLC med fabrikat VIPA som är kopplad till GSM-nätet.

### 3.3.2 Ympning, substrathantering och drift

Under pilotförsöket rötas en substratblandning som bygger på tillgängliga substrat att röta för Mönsterås Biogas, se tabell 3:1.

Vid beskickning av rötammaren användes pilotens blandningstank för att blanda ihop flytande substrat från pilotanläggningens lagertank, fast substrat från dess skruvficka, kranvatten samt rötammarinnehåll till en homogen pumpbar slurry. Efter omblandning pumpades denna slurry in i rötammaren.

Till pilotanläggningens ficka med bottenkruv tillfördes fastgödselfraktionerna höns-gödsel, kycklinggödsel och djupströgödsel ca 3 ggr per vecka. Fraktionerna blandades när ny fastgödsel tillfördes fickan.

Den höns- och kycklinggödsel som rötades hämtades vid ett tillfälle hos lantbrukare som medverkar i Mönsterås Biogas i samband med att försöksrötningen påbörjades och lagrades under hela projektiden. Höns-gödseln långtidslagrades i en öppen lastbilscontainer täckt med presenning och vindsäkra täcksektioner av korrugerad plast på ramar. Kasserade däck användes som nedhållningsvikter. Kycklinggödseln lagrades i IBC plasttank med avtagbart lock med en volym på 1000 l. Halmrik djupströgödsel hämtades från en gård i Uppland och sönderdelades med en köttkvarn innan den transporterades till platsen för genomförandet av pilotförsöket. Detta förfarande genomfördes vid 2 tillfällen, dels vid uppstart av rötningförsöket, dels efter 10 veckor.

Den andra leveransen av djupströgödsel räckte försöket ut. Denna djupströgödsel lagrades vid pilotanläggningen i 35 liters plastbehållare med lock.

Även svinflytgödsel och glycerol hämtades vid ett tillfälle vid starten av försöksrötningen och lagrades vid pilotanläggningen under hela försöket i IBC plasttankar med skruvlock. Nötflytgödsel levererades med vakuumlasterbil i anslutning till leveranser av nötflytgödsel till More Biogas produktionsanläggning. Under försöket fylldes pilotanläggningens lagertank för flytande substrat på vid ca 6 tillfällen med ny nötflytgödsel. I samband med ny leverans av nötflytgödsel tillfördes även svinflytgödsel och glycerol till pilotanläggningens lagertank. Glycerol ingick i den substratblandning som rötades från uppstart av processen fram till vecka 23 då denna fraktion fasades ut och från och med denna vecka fram till försöket avslutades vecka 27 rötades enbart stallgödsel, vatten och järnklorid men med bibehållna blandningsförhållanden.

Pilotanläggningen var kopplad till det lokala tappvattennätet och i samband med att fastgödsel tillfördes blandningstanken tillfördes även spädvatten i proportionerliga mängder.

TS-halten i lagertank för flytande slurry var ca 15,8 % och VS-halten utgjorde ca 90 % av TS medan TS-halten i fickan för fastgödsel var under försöksrötningen ca 37,5 % och VS-halten utgjorde ca 80 % av TS. Huvudsubstrat som var hönsgödseln hade en TS-halt på 32–39 % under försöket och dess totala innehåll av kväve var 27 kg/ton, se tabell 3:3 och 3:4.

Röttningsprocessen drevs vid 37 °C. För att snabbt starta röttningsprocess hämtades 5 m<sup>3</sup> ymp (rötkammarinnehåll från röttningsprocess) från Alvesta biogasanläggning. Ympens TS-halt var ca 5,6 % och dess innehåll av ammoniumkväve var ca 3,9 kg/ton, se tabell 3:3. Försöksrötningen pågick under 27 veckor.

En viktig parameter att kontrollera vid rötning av fjäderfägödsel är att svavelvätehalten i biogasen ej blir för hög. Därför har rötkammaren tillförts tillsatsmedlet järnklorid av fabrikatet KEMIRA PIX-111 för att säkerställa att svavelvätehalten i biogasen är ca 150 ppm eller lägre. Järnklorid pumpades direkt in i rötkammaren vid tre tillfällen per vecka.

Strategi för belastningshöjning, tillsats av järnklorid och styrning av ammoniumhalt via vattenspädning var baserad på Edström m.fl. (2013b).

Biogas Mönsterås hade huvudansvaret för att driva pilotanläggningen. RISE Jordbruk och livsmedel (RISE JoL) utbildade driftpersonal och följde röttningsprocessen via kommunikation med anläggningens styr- och övervakningsenhet.

Tabell 3:3. Kemisk sammansättning på ymp och höns gödseln. Analysen genomförd av Agrilab.

	Ymp, pilot	Höns gödsel	
TS	5,6	37,7	% av våtvikt
VS	77,5	81,0	% av TS
Total kväve	5,8	27,0	kg/ton
Organiskt kväve	1,8	20,3	kg/ton
Ammoniumkväve	3,9	6,6	kg/ton
Total kol	24,4	151,2	kg/ton
Total fosfor	0,56	5,10	kg/ton
Total kalium	2,56	8,77	kg/ton
Total magnesium	0,38	2,21	kg/ton
Total kalcium	0,89	14,82	kg/ton
Total natrium	0,78	1,14	kg/ton
Total svavel	0,44	2,14	kg/ton
Total koppar		41	mg/kg TS
Total järn		711	mg/kg TS
Total mangan		504	mg/kg TS
Total zink		315	mg/kg TS

Tabell 3:4. Substratens innehåll av TS och VS. Enheten för TS är % av våtvikt och för VS % av TS. Analyserna är genomförda av RISE JoL.

	TS-medel	TS-min	TS-max	VS-medel	VS-min	VS-max
Höns gödsel	35,9	32,1	38,9	69,2	62,0	78,0
Kyckling gödsel	63,7			84,8		
Nötflyt gödsel	8,9	8,1	9,6	80,1	75,3	84,3
Svinflyt gödsel	2,8			65,9		
Djupströgödsel	22,7	19,6	25,9	80,3	73,4	87,3
Glycerol	100 <sup>x)</sup>			100 <sup>x)</sup>		
Rötrest till efterrötning <sup>z)</sup>	6,89	6,85	6,97	67,6	66,9	67,8

x) antaget värde. Analys genomfördes ej på grund av bedömning att glycerol som förångas med använda analysmetoder bedöms utgöra en brandrisk.

z) Rötrest från pilotrötkammaren från vecka 18 som användes för ympning av kontinuerlig efterrötning under AP3.



### 3.3.3 Centrifugering av rötrest

#### Centrifugering i laboratorium

Separeringen av rötrest före titrering av den genererade tunnfasen genomfördes med en laboratoriecentrifug från Beckham med rotor JA-14. Centrifugeringen pågick under 20 minuter vid 4500 rpm som motsvarar en kraft på 3000 g.

#### Beskrivning av dekantercentrifug

Centrifugering av den rötrest som mobila pilotanläggningen producerade genomfördes med en dekantercentrifug från Noxon DC 10FCSH med ett maximalt varvtal på 2200 rpm. Centrifugen hade steglös varvtalsreglering av både trumman och skruven och den hade en kapacitet på ca 15 m<sup>3</sup>/h inmatning. Detta val av centrifug byggde på tidigare tester som genomförts med Noxons minsta centrifug.

Dekantermaskinen var monterad i en vanlig 20-fots container och levererades med en lös utmatningsskrub för den fasta fasen. Efter montage av skruven, och med containern kvar på släpvagnen, kunde IBC-behållare användas för att ta hand om de separerade fraktionerna. För tunnfasen användes en mellanliggande pumptank med dränkbar pump. Släpet hade nivåjusteringsmöjlighet, för maskinen måste stå horisontellt. Inmatning till centrifugen skedde via en 3" gavelanslutning, till vilken tankbilsäkeriet ordnade anslutningar. I containern fanns också upplösnings- och doseringsutrustning för polymer men den använde vi inte. Centrifugen hade inte kontinuerligt ställbara utloppsluckor från trumman.

Vid testet med dekantercentrifugen var slutresultatet beroende av följande samband:

1. Hög TS i fasta fasen genom att matningen är låg och varvtalet hålls högt, samtidigt som vätskenivån i trumman hålls låg, så att tiden som "sedimenterat" material befinner sig ovanför vätskenivån räcker till för bra dränering av fasta fasen. Skruven som matar ut den fasta fasen roterar med 1–5 varv/min högre varvtal än trumman.
2. Hög renhet i den tunna fasen genom att matningen är låg och vätskenivån är hög i trumman. Då blir uppehållstiden i vätskefasen tillräckligt lång för att även små partiklar skall hinna sedimentera på insidan av trumman. Det kommer naturligtvis att påverka TS-halten på den fasta fasen negativt.
3. Hög kapacitet erhålles om maskinen har större geometri, dvs. så att uppehållstid i de olika nivåerna kan tillgodoses även om matningen ökar.
4. Högre varvtal ökar G-krafterna så att mindre partiklar kan förmås att "sedimentera" på insidan av trumman. Det bör observeras att det bara är densiteten på partiklar eller vätskeformiga medier som gör att de kan skiljas ut med en centrifug. Partiklar som är lättare än vatten kommer att flyta och följa med tunnfasen också i en centrifug. Det finns dekantercentrifuger som kan avskilja både fast fas, vattenfas och en oljefas som flyter på vattnet.

## Genomförande

Testet med dekantercentrifugeringen genomfördes utan någon tillsats av flockningskemikalie och det var en operatör från Noxon på plats som övervakade och styrde maskinen. Med i Noxons försöksanläggningen fanns en snabbmetod för att bestämma producerade fraktionernas ungefärliga TS-halt. Tidsbehovet för att genomföra varje TS-analys var ca 1 timme per prov.

Den producerade rötresten lagrades i IBC plasttankar (rektangulära) där varje tank hade en volym på 1000 l.

En vakuumsbil med släp användes för att förse dekantercentrifugen med rötrest. Rötrest lagrad i IBC-behållarna sögs över till vakuumsbilens. Den rötrest som skulle centrifugeras fylldes till släpet i två omgångar. Dragbilens tank användes för att ta hand om den bildade tunnfasen efter centrifugeringen.

För att kalibrera centrifugen genomfördes en körning där det centrifugerades en annan rötrest (från More Biogas biogasanläggning). Därefter kördes en kort kalibreringstest med rötrest producerad under AP 1, bl.a. med inställning för hög TS i fastfasen.

Därefter genomfördes själva centrifugeringen av all den rötrest som genererats under AP1 fördelat på två omgångar. Den producerade tunnfasen under dessa två omgångar användas vid indunstningstestet. Vid:

Omgång ett var fokuset att producera en tunnfas med låg TS samtidigt som fasta fasen skulle få en hög TS-halt.

Omgång två var fokuset att producera en tunnfas med så låg TS som centrifugen kunde ställas in för men utan några egentliga krav gällande TS-halt på fasta med en matningshastighet som var rimlig i förhållande till storleken på centrifugen.

Fast fas vägdes med pallvägar och lämpades över i ett växelflak.

Rötrestmängd uppskattades via volymmätning i IBC lagertankarna.

Den genererade volymen tunnfas efter centrifugeringen lagrades sedan i IBC plasttankar. Producerad mängd tunnfas uppskattades via volymmätning i IBC-tankarna. Saken komplicerades av att det var en omfattande skumning i tunnfasutloppet från centrifugen och till försöket var det inte förberett med någon skumdämpare.

### 3.3.4 Indunstning av tunnfas från centrifug

Indunstningsförsöket genomfördes i samverkan med norska företaget Epcon, som har en pilotanläggning som bygger på mekanisk ångkomprimering (s.k. MVR-indunstare) med fallfilmsvärmeväxling för att återvinna ångbildningsvärmets. Indunstaren var monterad i en specialbyggd 20-fots container. Fallfilmsdelen var ett torn som kunde fällas upp genom en lucka i taket. Under testet var en operatör från Noxon på plats som övervakade och styrde indunstaren. Indunstning genomfördes på den tunnfas som genererades vid centrifugeringen av lagrad rötrest. Före indunstningen sänktes tunnfasens pH-värde från 8,0 till 5,0 via tillsats med svavelsyra med koncentrationen 96 % från Kemira som levererades i 60 l plastdunkar.

För surgörningen hade en 1 m<sup>3</sup> IBC-behållare kapats upp i toppen, så att det blev ett stort hål för en toppmonterad omrörare, som klämdes fast på ramen. Omröraren var en Euromoxers, hade en märkeffekt på 0,75 kW och gick kontinuerlig under surgörningen. Via en tryckluftsdreven membrandoseringspump tillfördes svavelsyran i omgångar under vätskeytan i blandarbehållaren. På omrörarramen fanns ett doseringsfack för skumdämpare placerad nära den vertikala omröraraxeln. Under försöket användes denna liksom en vanlig sprayflaska för vatten fylldes med utspädd skumdämpare för applicering av skumdämparen på ytan, för att kunna slå ner hastigt expanderande skum då syran tillfördes. Fyra olika slags skumdämpare provades från Schill + Seilacher med samlingsnamnet Struktol avsedda för användning i livsmedelsindustrin. I behållaren placerades en dränkt pump för att pumpa över den surgjorda tunnfasen till lagerbehållare inför indunstningen. Vid surgörningen användes en portabel pH-mätare för direktmätning på skumfri vätskeyta.

Samtliga var fria från silikonolja och användes inom livsmedelsindustrin. Vi hade inte intrycket att de följde med i kondensatet från indunstningen, vilket däremot silikonoljebaserad produkt vid det tidigare indunstningsförsöket i Trondheim tydligt visade genom att kondensatet grumlades.

Enligt Epcon drivs deras MVR-indunstare huvudsakligen med återvunnet ångbildningsvärme men med viss tillförsel av elektricitet för att driva en kompressor som komprimerar och värmer den ånga som indunstaren genererar. Eftersom anläggningen i princip inte genererade någon restgas kan ammoniakförlusterna via detta ångflöde anses vara försumbar. Anläggningens energianvändning vid drift är i princip bara elektricitet. Elbehovet för en produktionsanläggning anges till 8–40 kWh/ton förångat vatten ([www.epcon.org](http://www.epcon.org)).

## 3.4 Rötningsförsök i laboratorieskala

### 3.4.1 Efterrötning i CSTR

Kontinuerliga efterrötningsförsök genomfördes i en laboratorierötkammare (CSTR, dvs. totalomblandad rötningsprocess med semikontinuerlig matning) som drevs vid 37 °C med totalvolym på 10 liter och aktiv volym på 5 liter. Som ymp användes rötkammarinnehåll ifrån pilotanläggningen efter att försöksrötningen pågått i 18 veckor. Ympens kemiska sammansättning beskrivs i tabell 3:3 och 3:4. Gasproduktionen mäts kontinuerligt med gasmätare av fabrikat Dolly System (Bellach Bioteknik) som kalibreras med en vätgasmätare av fabrikatet Ritter modell TG05/5.

### 3.4.2 Satsvisa utrötningar

Biometan potential (BMP) försök genomfördes i flaskor med totalvolymen 500 ml och aktiv volym 300 ml. Flaskorna fylldes med ymp och substrat i kvoten 4:1, gasfasen byttes ut mot N<sub>2</sub> i syfte att skapa en anaerob miljö varefter flaskorna förslöts och en l tedlar<sup>TM</sup> påse kopplades till varje flaska för insamling av gas. Flaskorna sattes sedan i vattenbad vid 37 °C. Mängden tillsatt VS från substraten var 0,6 g / flaska. De substrat som undersöktes var nötflytgödsel, hönsgödsel, svinflytgödsel samt två olika gödselblandningar med och utan glycerol, se tabell 3:5. Gasens sammansättning analyserades med en

Biogas 5000 analysator. Varje substrat utvärderades i trippel-uppsättning. Ympen avgasades genom att den fick stå i vattenbad vid 37 C under en vecka innan försöket startades.

Tabell 3.5. Sammansättningen % av tillsatt VS av de olika substraten hos de undersökta blandningarna.

Substrat (% av VS i blandningen)	Blandning 1 + glycerol	Blandning 2 + glycerol	Blandning 1 utan glycerol	Blandning 2 utan glycerol
Höns	60	60	72	72
Nöt	12	16	14	19
Svin	1,4	1,4	1,7	1,7
Kyckling	6,2	6,2	7,4	7,4
Djupströ	4,1	-	4,8	-
Glycerol	16	16	-	-

### 3.4.3 Bestämning av restgaspotential

Restgaspotentialen hos rötresten från pilotförsöket respektive rötresten efter det semikontinuerliga laborieförsöket undersöktes enligt beskrivningen ovan 3.4.2. Försöket pågick under 60 dagar.

## 3.5 Fysikaliska egenskaper

### 3.5.1 Viskositet

För att bestämma viskositeten på rötrestprov användes en Brookfield LVDV-II rotationsviskosimeter. Viskositeten på rötkammarinnehållet bestämdes vid en temperatur på 37 °C. Använda spindlar 31 och 34 vid viskositetsbestämningen har tillverkats av Brookfield Engineering Laboratories.

Metoden kan visa om vätskan är newtonskt eller icke-newtonskt. För newtonska vätskor är viskositeten  $\mu$  en konstant (Scanpump, 2008) där skjuvspänningen  $\tau$  är beroende av hastighetsgradienten  $\partial u / \partial y$  enligt ekvationen:

$$\tau = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

För icke icke-newtonska vätskor gäller dock att viskositeten ej är konstant för vätskan. Då gäller istället följande potensekvation för viskositeten:

$$\mu = K \left( \frac{du}{dy} \right)^{(n-1)}$$

där konstanten K beskriver flödeskonsistensen, konstanten n flödesbeteendet och  $du/dy$  är skjuvhastigheten.

Observationer av hur effektiv omrörningen i rötammaren har varit bygger dels på att försöka bedöma ythastigheten för rötammaren (via rötammarens inspektionsfönster) som funktion av omrörarens rotationshastighet, dels dokumentera omrörarens elbehov enligt Nordgren (2014) samt Scanpump (2018).

### 3.5.2 Partikelstorlek

Partikelstorleken bestäms på den gödsel som rötades liksom för den rötade gödselblandningen. Partikelstorleken bestäms via vätsilning med maskstorlek på 4 mm, 2 mm och 1 mm. Dessa silar placeras ovanpå varandra. Därefter läggs en känd mängd av materialet på silen. Därefter spolas materialet med riklig mängd vatten.

Den uppsamlade mängden torkas därefter i 105 °C och vägs. Därefter går det att bestämma andelen av vätvikt för de olika fraktionerna och utifrån TS-halten på ursprungsmaterialet går det även att göra en grov bedömning av andelen av TS för de olika fraktionerna.

## 3.6 Bedömning av förädlade rötrestens värde

Utvärdering av produkterna för användning som ett gödselmedel är baserad på: 1) en analys av värden av växtnäringsinnehåll och användning av produkterna som gödsel, och 2) en bedömning om möjligheterna att använda befintliga teknik för spridning. Anläggningen som beskrivs i figur 1.1 resulteras i fyra olika gödselprodukter: biogödsel (direkt från rötammaren), fastfas, tunnfas och koncentrat som alla har olika egenskaper.

### 3.6.1 Växtnäringsvärde

Växtnäringsinnehåll i de fyra produkterna visas i tabell 4:3 och 5:2. Analysen av växtnäringsvärden utgår ifrån innehållet av kväve, fosfor, kalium och svavel även om de andra mikronäringsämnen också har ett värde. Det kan också finnas ett värde i att sprida organisk gödsel på en växtodlingsgård som bara brukar använda mineralgödsel, men det värdet får man lägga ovanpå växtnäringsvärdet.

#### ***Konventionell odling***

Värdet av själva växtnäringsen i produkterna kan enkelt beräknas utifrån kostnaden för att köpa motsvarande näringsämnen på marknaden. För konventionella gårdar beräknar man utifrån kostnaden på att köpa motsvarande växtnäringsämnen som mineralgödsel. Det finns olika metoder för att bestämma kostnad på enskilda näringsämnen eftersom det finns olika mineralprodukter och många har flera näringsämnen i samma produkt. För denna studie används en pris på 10, 20, 8 och 4 kr/kg för N, P, K och S respektive (Erik Sindhøj, personlig kommentar).

Produkternas växtnäringsvärde ( $VV_k$ ) beskrivas som följande:

$$VV_k = \sum_{v=1}^n (P_v \cdot X_v \cdot E_v)$$

där  $v$  är växtnäringsämnen som räknas (N, P, K och S),  $P_v$  är kostnaden för att köpa växtnäringsämnen i mineralform,  $X_v$  är koncentrationen av växtnäringsämnen i

produkten, och  $E_v$  är effekt av växtnäringsämnen med hänsyn till växttillgängligheten av näringsämnena jämfört med mineralgödselkvivalenterna. I stallgödsel ligger fokus på  $E_v$  bara på kvävet effektivitet eftersom de andra näringsämnena som behövs i mindre mängder brukar vara tillräckligt tillgängligt för att inte begränsa tillväxten. Det finns dock en risk att fosfor i biogödseln och dessa produkter är mindre tillgängligt eftersom tillsatsmedlet järnklorid användes under rötning. Järnklorid tillsattes för att minska svavelvätehalten i biogasen men är också effektivt på att binda fosfor och därefter blir tillgängligheten låg. I väntan på mer detaljerade studier om fosfors tillgänglighet i framtagna produkter räknas fosfors effekt här till 100 %. Ammoniumkväve i stallgödsel och biogödsel fungerar som mineralkväve och är lätt tillgängligt för växterna medan den organiska kväve delen är långtidsverkande och svårt att veta när den frigörs. Denna långtidsverkan har också ett värde men det är ammoniumkvävedelen som växterna får direkt effekten av så  $E_N$  beräknas som andelen ammoniumkväve av totalkväve. Ammoniumkvävet i koncentratet kan ha förvandlats till ammoniumsulfat efter surgörning med svavelsyra men det påverkar inte  $E_N$  eftersom försök visar ammoniumsulfat har samma effekt som andra former av mineralkväve (Nilsson, 2018).

### **Ekologisk odling**

Det finns inte lika etablerade gödselmedel för ekologiska växtodling som vid den konventionella. De kommersiella ekologiska gödselmedlen, med högt växtnäringsinnehåll innehåller 44 - 100 kg totalkväve/ton koster 2 - 4 kr/kg och består av pelleterade produkter. Dessa gödselmedel innehåller en blandning av köttmjöl/benmjöl och höngödsel alternativt Vinass från jästindustrin. Kvävet i dessa gödselmedel består av organiskt bundet kväve och har en C/N kvot på ungefär 4,0 och anges vara lämpliga för odling av spannmål och oljeväxter (Ögren, 2016). Baserat på dessa gödselmedel går det inte särskilja värdet av de enskilda makro-näringsämnena NPKS.

Växtnäringsvärde som ekologiskt gödselmedel kan uppskattas genom att beräkna värdet baserat bara på innehållet av kväve ( $VV1_e$ ) som Linnell m.fl. (2016) har gjort, eller alternativt att beräkna ett värde för summan av alla makro-näringsämnen (N+P+K+S) i produkterna ( $VV2_e$ ). Noterbart är alltså att värderingen bara utifrån kväveinnehållet medför att övriga växtnäringsämnen saknar värde, samtidigt som svagheten med att värdera utifrån summan av alla makro-näringsämnen är att alla blir lika värd. Räknat utifrån sex stycken gödselmedel som anses lämplig för spannmålsodling från Ögren (2016), blir värdet av kväve mellan 37 – 49 kr/kg medan värdet av samtliga makro-näringsämnena (NPKS) blir mellan 20 – 27 kr/kg. Vid beräkningarna av växtnäringsvärde för ekologisk odling av biogödseln och de tre produkterna har följande växtnäringspriser valts att användas:

- 44 kr/kg totalkväve
- 24 kr/kg NPKS

Frakt och spridnings kostnader är exkluderat. Vidare är viktigt att poängtera att metoderna här inte tas hänsyn till växtnärings effekt ( $E_v$ ) på samma sätt som det gjorde för konventionell odling. Eftersom allt kväve är organiskt kväve måste det mineraliseras först innan det blir växttillgängligt.

## 4 Resultat från empiriska försök

Försökets hade 3 stycken arbetspaket (AP) med empiriska försök enligt följande.:

- AP1. Pilotförsök med rötning av de tilltänkta substraten
- AP2. Tillämpade försök med separation och koncentrerings av rötrest
- AP3. Laboratoriestudier som fastställer substratens biogaspotential samt möjligheten att utvinna mer biogas via efterrötning

Dessutom innehöll projektet ett arbetspaket AP4 som utgående från resultat från AP 1 och AP2 beräknar det förädlade biogödselns växtnäringsvärde och funktion som gödsel i ekologisk växtodling. Resultat från AP4 redovisas i kapitel 5.

Resultat från varje arbetspaket i ett separat kapitel.

### 4.1 AP 1 – Pilotförsök

#### 4.1.1 Röttningsprocessen

Pilotens röttningsprocess startades upp 14 februari via ymp från Alvesta biogas-anläggning. Rötkammarens organiska belastning var initialt efter ympningen 1,8 kg VS/m<sup>3</sup> & d men ökades gradvis, se Bilaga 1. Erfarenheten är att det med en relativt kvävetålig ymp går att starta upp en robust och effektiv röttningsprocess med den aktuella substratblandningen på ca 3 månader.

Röttningsprocessen drevs de första 22 veckorna med den substratblandning som beskrivs i tabell 3:1. Vecka 18 uppnåddes målbelastningen på 3,8 kg VS/m<sup>3</sup>&d vilket resulterade i en uppehållstid i rötkammaren på ca 29 dagar. Vid denna tidpunkt hade inmatade mängden substrat medfört 3 st. reaktoromsättningar. Därefter drevs röttningsprocessen på detta sätt till vecka 23 då 4,3 reaktoromsättningar uppnåts. Under denna tidsperiod rötade anläggningen ca 46 kg fastgödsel/dag, 36 kg slurry/dag och 89 kg spädvatten/dag och tillförslin av järnklorid motsvarade 0,33 viktprocent av denna substrattillförsel. Det skall noteras att dessa mängder är veckomedelbaserade värden och att det dagligen förekom stora avvikelser i mängden fastgödsel och slurry som tillfördes beroende på praktiska omständigheter, se kapitlet ”4.1.2 Tekniska erfarenheter”. Anläggningen drevs med 3 olika substratrecept under veckan för att reducera antalet tillsynstillfällen av anläggningen till 3 ggr per vecka. De 3 recepten bestod av: 1) enbart fastgödsel, 2) enbart slurry och 3) en blandning av fastgödsel och slurry. Målet med uppbyggnaden av varje recept var, att den dagliga biogasproduktionen, så långt det var möjligt, skulle vara konstant samt att under veckan ha rötat en substratblandning i enlighet med beskrivningen i tabell 3:1. Driftstrategin medförde dock att gasproduktionen under veckan varierade mellan ± 10 till ± 20 % kring gasproduktionens veckomedelvärde.

Specifika metanproduktionen då glycerol ingick i substratblandningen var ca 0,28 Nm<sup>3</sup>/kg VS vilket resulterade i en substratrelaterad metanproduktion på 31 Nm<sup>3</sup>/ton vätvikt och en volymetrisk metanproduktion på 1,1 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>&d, se tabell 4:1.

Vecka 23 fasades glycerolen ut, förhållandena mellan övriga delsubstraten var dock lika vilket medförde en sänkning av belastningen till ca 3,2 kg VS/m<sup>3</sup> & d, se Bilaga 1.

Anläggningen drevs på detta sätt till vecka 25. Gasproduktionen sjönk snabbt. Specifika metanproduktionen sjönk under denna period till ca 0,24 Nm<sup>3</sup>/kg VS vilket resulterade i en substratrelaterad metanproduktion på 24 Nm<sup>3</sup>/ton våtvikt och en volymetrisk metanproduktion på 0,8 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>&d, se tabell 4:1.

Tabell 4:1. Gasproduktion med och utan tillsats av glycerol.

	Inklusive glycerol	Exklusive glycerol	
Specifik metanproduktion	0,28	0,24	Nm <sup>3</sup> /kg VS
Substratrelaterad metanproduktion	31	24	Nm <sup>3</sup> /ton
Substratrelaterad biogasproduktion	49	36	Nm <sup>3</sup> /ton
Volymetrisk metanproduktion	1,1	0,8	Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> &d
Volymetrisk biogasproduktion	1,7	1,2	Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> &d
Metanhalt	63,8	65,1	%
Koldioxidhalt	36,2	34,9	%
Svavelväte	120	160	ppm

Under vecka 25–27 genomfördes tekniska test som påverkade substratblandningen varför gasproduktionsdata från denna period ej är representativ. Under de 27 veckornas försöksrötning tillfördes röt-kammaren totalt 26 978 kg bestående av:

- 6 803 kg fastgödsel
- 5 759 kg slurry
- 14 413 liter vatten

Under den avslutande halvan av försöket varierade rötrestens TS-halt mellan 6,5 och 7,0 % av våtvikt och VS-halten utgjorde 66,8 – 68,5 % av TS, se tabell 3:3 och 3:4. Rötrestens innehåll av totalkväve i slutet av försöksrötningen (vecka 27) var 7,8 kg/ton varav ammoniumkvävehalten utgjorde 5,7 kg/ton, se tabell 4:3. Rötrestens kemiska sammansättning vecka 18 var ungefär lika som för vecka 27.

Tabell 4:2. Analyser genomförda på rötrest under driftuppföljning av pilotröttningsprocessen. Med avseende på TS och VS under perioden vecka 15–27. Enheten för TS är % av våtvikt och för VS % av TS. Analyserna är genomförda av RISE JoL.

	TS-medel	TS-min	TS-max	VS-medel	VS-min	VS-max
Rötrest	6,83	6,48	7,02	67,9	66,8	68,5



Tabell 4:3. Kemisk sammansättning på producerad rötrest vid pilotanläggningen efter 18 respektive 27 veckors drift. Analysen genomförd av Agrilab.

	Rötrest vecka 18 <sup>x)</sup>	Rötrest vecka 27	
TS	7,1	6,8	% av våtvikt
VS	68,7	68	% av TS
Totalkväve	8,0	7,8	kg/ton
Organiskt kväve	1,9	2,1	kg/ton
Ammoniumkväve	6,1	5,7	kg/ton
Total kol	26,4	26,8	kg/ton
Total fosfor	1,39	1,31	kg/ton
Total kalium	4,25	4,45	kg/ton
Total magnesium	0,64	0,58	kg/ton
Total kalcium	2,76	2,70	kg/ton
Total natrium	0,54	0,58	kg/ton
Total svavel	0,58	0,68	kg/ton

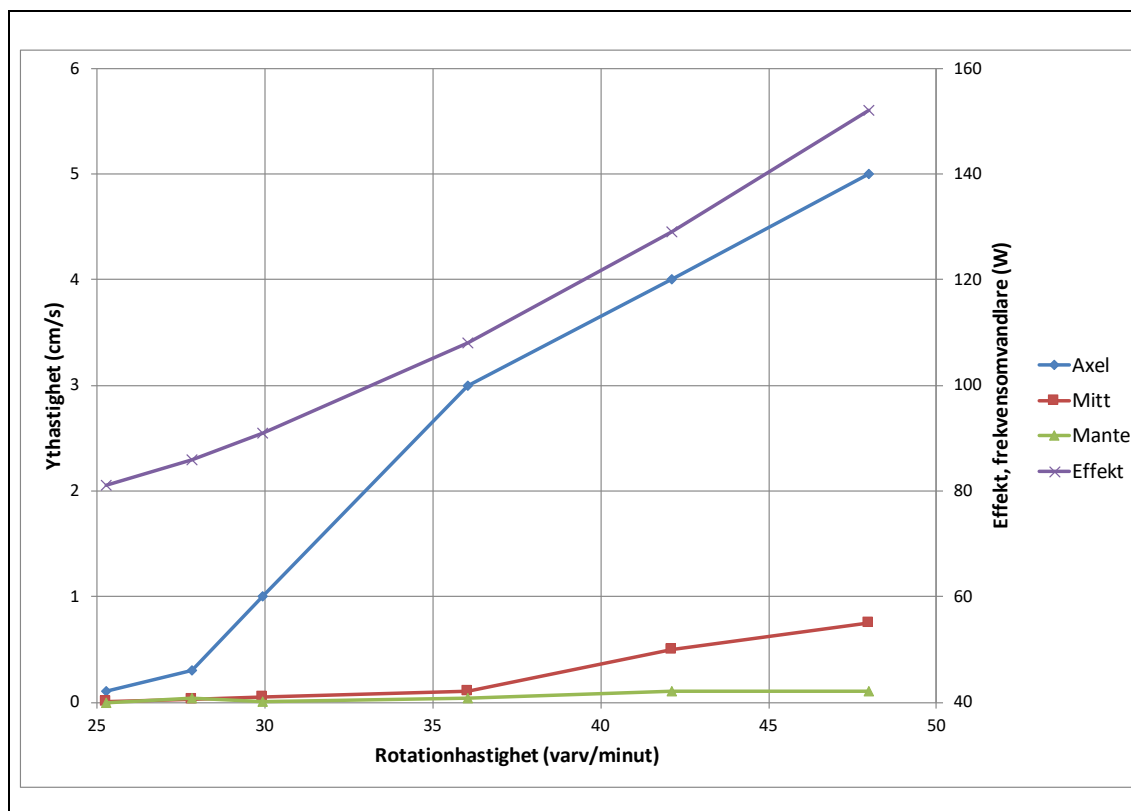
x) Ymp & råvara för kontinuerlig efterrötning vid lab.-försök i AP3.

## 4.1.2 Tekniska erfarenheter

### Omrörning

Under vecka 21 genomfördes en studie där röt-kammarens omrörningsegenskaper studerades. Ythastigheten, som funktion av omrörarens rotationshastighet, beskrivs i figur 2 nära omröraraxeln (Axel), mitten emellan axel och röt-kammarens sidovägg (Mitt), respektive invid röt-kammarens sidovägg (Mantel). Vid rotationshastigheter på 48 varv/minut fanns det ett tunt skumlager ca 4 dm från omrörarens axel och hela vägen till röt-kammarens sidovägg. Vid rotationshastigheter på 42 varv/minut eller lägre fanns ett tunt skumlager i princip över hela ytan även nära omrörarens axel, men där går att se en tydlig rörelse vid axeln på ca 4 dm/s. Vid rotationshastigheter på 25 varv/minut eller lägre fanns ett tunt skumlager över hela ytan, nära omrörarens axel gick det att urskilja en mycket svag rörelse på ytan medan resten av ytan stod stilla. Hastigheter under 25 varv/minut gav bara en krusning på ytan invid omrörarens axel, men detta skapade ingen förflyttning av ytan.

Det testades även rotationshastigheter mellan 50 och 70 varv/minut. Vid dessa varvtal bildades det vågor på ytan.



Figur 2. Bedömd ythastighet och el-effektbehov vid olika rotationshastigheter för röt-kammarens omrörare.

För att säkerställa en god omrörning av röt-kammaren drevs dess omrörare med en rotationshastighet på 36 varv/minut under försöksrötningen. Vid denna rotationshastighet fanns skum i princip över hela ytan. Det gick att iaktta en tydlig ytrörelse från omrörarens axel och 4–5 dm ut från axeln.

### Sediment

Efter att försöket avslutas återfanns 600 kg sediment i röt-kammaren efter att den tömts på sitt slamnehåll. Det återfanns också sediment som låg i rörledningar för pumpning av substrat. Det förekom även sedimentbildning i de lagerbehållare där rötrest lagrades inför den centrifugering som genomfördes i AP2. Hönsens foder berikas med kalcium för äggskalsbildningen, vilket bedöms vara huvudorsaken till sedimenteringen, både vid hantering av pumpbara substratblandningar liksom hantering av rötrest inklusive röt-kammarinnehåll.

### Valvbildning i lagerficka för fastgödselblandning

I pilotanläggningens lagerficka med bottenliggande dubbelskriv för fastgödselblandningen uppstod valvbildning efter att 30–35 kg fastgödselblandning matats ut med skrivuven. Vidare kladdade fastgödseln fast på de roterande skrivuvarna och i viss mån på lagerfickans väggar. Det var höns-gödselns vidhäftande egenskaper som var orsaken. Valvbildningen medförde att pilotanläggningen drevs med 3 olika matningsrecept under veckan för att reducera antalet tillfällen då anläggningen bemannades, se beskrivningen i kapitel "4.1.1 Rötning-processen".

## Övrigt

Generellt gick det bra att pumpa substrat och rötrest med pilotanläggningens excenterskruvpumpar. Dock stoppade excenterskruvpumpen mellan blandningstanken och rötkammaren vid ca 3 tillfällen troligen på grund av större föremål som fanns i hönsgödseln som kilade fast mellan stator och rotor. Excenterskruvpumpen behövde ej demonteras. Detta stopp gick att åtgärda genom att vrida rotern bakåt med rörtång och därefter starta excenterskruvpumpen igen och då kunde det som orsakade stoppet passera igenom pumpen.

Det fanns tillfällen då det gick att höra skrapande ljud från blandningstanken då dess paddelomrörare var i drift med att blanda fastgödsel, vatten, slurry och rötkammarinnehåll. Det som orsakade ljudet pumpades samband med beskickning in i rötkammaren, varför det ej gick att identifiera objektet som orsakade detta ljud.

Rötrestens lukt bedöms inte vara besvärande av de personer som arbetade i projektet och det gick inte att tydligt känna någon lukt av hönsgödseln som var huvudsubstratet. Det genomfördes dock ingen studie för att försöka karakterisera och kvantifiera rötrestens lukt.

Vid det manuella uttaget av hönsgödsel från långtidslagret under sommarmånaderna juni-augusti, för rötning i pilotanläggningen, upplevdes det lukten av ammoniak från hönsgödsel som mycket skarp. Vid denna tid hade hönsgödseln legat på flak 5–6 månader men i flaket syntes inte mycket tecken på biologisk aktivitet.

### 4.1.3 Fysikaliska erfarenheter

I samband med viskositetsmätningen på rötkammarinnehållet (prov från vecka 18) silades provet, vars TS-halt var 6,93 %, genom såll med olika storlekar på dess öppningar, se tabell 4:4. Vid silning avskildes 5 % av provet innehåll av torrs substans i sållet med hålöppningen 4 mm medan 68 % av provet torrs substansinnehåll passerade igenom alla sållen vilket innebär att dess partikelstorlek var mindre än 0,5 mm. Av provets TS-halt på 6,93% kom 0,35 % från partiklar med storlek större än 4 mm medan de minsta partiklarna som passerade 0,5 mm sållet bidrog med 4,75 % av provets TS-halt.

Tabell 4:4. Partikelförekomst i det slam som finns i rötkammaren.

Parameter	Distribution av torrs substans % av provets torrs substans	Bidrag till provetets TS-halt % av våtvikt
> 4 mm	5	0,35
2–4 mm	11	0,79
1–2 mm	7	0,47
0,5–1 mm	9	0,61
<0,5 mm	<u>68</u>	<u>4,75</u>
<b>Summa</b>	<b>100</b>	<b>6,93</b>

Viskositeten bestämdes på rötkammarinnehållet (från vecka 18) med en rotationsviskosimeter. Bestämningen visade att provet är icke-newtonskt, se kapitel ”3.5.1 Viskositet”. Vid bestämningen av viskositeten har spindel 31 använts. Utgående från  $n$ - och  $K$ -värdena kan den skenbara viskositeten beräknas till 11 för skjuvhastigheten  $60 \text{ s}^{-1}$ , se tabell 4:5. Konstanten  $n$  i potensekvationen är mindre än 1 för rötkammarinnehållet vilket medför att rötkammarinnehållet har skjuvtunnande egenskaper.

Tabell 4:5. Konstanterna  $K$  och  $n$  i potensekvationen för icke-newtonsk vätska som beskriver viskositeten för slammet i rötkammaren samt skenbar viskositet vid skjuvhastigheten  $60 \text{ s}^{-1}$ .

	$K$	$n$	Skenbar viskositet ( $du/dy = 60 \text{ s}^{-1}$ ) mPas
Spindel 31	0,284	0,456	11

## 4.2 AP 2 - Produktion av supergödsel

Det skall noteras att rötresten har lagrats under 4–8 månader under varma betingelser innan den centrifugerades där den genererade tunnfasen lagras ytterligare 1 månad innan den surgjordes och indunstades. Det ingick ej i denna studie att undersöka rötrestens lagringsstabilitet. Under lagringen kunde tunga partiklar i lagerbehållarna sedimentera, biologisk aktivitet pågå i lagret och ammoniakavgång ske. Alla dessa parametrar tillsammans med felkällor som uppkommer vid själva processandet av rötresten, provtagning och analysens osäkerhet gör det besvärligt att få massflöden liksom flöden av torrsbstans, växtnäring och mineraler att gå ihop. Därför väljer vi att i detta kapitel redovisa faktiska analyser på de gödselmedel som genererats vid förädlingen av den lagrade rötresten. Däremot redovisas i kapitel 5 en massbalans från substrat till gödselmedel som baserar sig på egna tolkningar där vi använt analyserade värdena för delflödena vid centrifugering och indunstning för kalibrering av massbalansberäkningar med utgångspunkt att denna rötrestförädling genomförts direkt på producerad rötrest.

### 4.2.1 Centrifugering

Vid centrifugeringen av den lagrade rötresten genererades en fast fas och en tunnfas vars sammansättning redovisas i tabell 4,6. Centrifugen är effektivt att separera bort större partiklar men klarar inte av att separera bort suspenderat material (finpartikulära partiklar även kallade kolloider) med mikrometerstorlek. Detta suspenderade material bidrar tillsammans med salter i tunnfasen till den analyserade TS-halten på 3,2 %, se tabell 4.6. Avskiljningen av fosfor till fasta fasen var förvånansvärt hög, vilket resulterade i att fasta fasens fosforinnehåll blev 6,0 kg/ton medan tunnfasen bara hade ett fosforinnehåll på 0,4 kg/ton. Beräkning av centrifugens separationseffektivitet för en fullskala redovisas i kapitel 5.1. Praktiska erfarenheter mm redovisas i Bilaga 2.

Betydande skumbildning uppstod under centrifugeringen. Skumdämpare användes dock inte.

Tabell 4:6. Kemisk sammansättning på fast fas respektive tunnfas efter centrifugering av lagrad rötrest. Analysen genomförd av Agrilab.

	Fast fas	Tunnfas	
TS	20,9	3,2	% av våtvikt
VS	67,7	57,7	% av TS
Totalkväve	8,7	5,5	kg/ton
Organiskt kväve	5,2	1,4	kg/ton
Ammoniumkväve	3,4	4,1	kg/ton
Total kol	79	11,8	kg/ton
Total fosfor	6,0	0,4	kg/ton
Total kalium	4,6	4,9	kg/ton
Total magnesium	3,6	0,1	kg/ton
Total kalcium	13,1	0,9	kg/ton
Total natrium	0,6	0,7	kg/ton
Total svavel	2,0	0,5	kg/ton

### **Tekniska erfarenheter**

Önskemål om dels hög TS i fastfasen, dels låg TS i tunnfasen, gjorde att operatören från Noxon hade en låg inmatning, så att hela rötrestpartiet tog ca 10 tim att köra igenom, dvs. ca 2 m<sup>3</sup>/tim. Vi hade inga pluggproblem i centrifugen men inmatningen från tankbilen gick inte helt smidigt. Det torde ha orsakats av att partiklar i rötresten satt igen ventiler på vägen till centrifugen.

Den initiala testet gick att genomföra med bara ringa skumbildning men successivt ökade skumningsproblemen under testet, vilket medförde att den ursprungliga planerade viktmätningen av både tunnfas och fastfas med pallväg ej gick att genomföra. Vidare förlorades en viss mängd med skum som rann ut på backen. Provtagningarna gjordes regelbundet för att få samlingsprov med begränsad spridning.

Massbalansen räknat som IBC-volym in och IBC-volym ut samt fastfas indikerade att det kan ha funnits oupplösta sediment som stannade i slambilstanken, som inte hade någon mekanisk omrörare.

### **Fysikaliska erfarenheter**

Valet av centrifugen som fassetseparator berodde dels på att den effektivt kan separera bort partiklar som kan sedimentera och störa indunstningen, dels på att vi ville se hur mycket fosfor från vår rötrest som kunde styras över till fastfasen. Fosfor är knuten till partiklarna (suspenderat material) medan ammoniumkvävet är löst som ammoniak eller som ammoniumsalter och därmed följer vätskefasen.

Halten suspenderat material kan också bestå av partiklar (eller kolloider), som har lägre densitet än vätskan och då kan de inte avskiljas med en centrifug. Följaktligen finns suspenderat material i de 3,2 % TS som fanns i tunnfasen. TS består också av salter.

Resultatet av provtagningarna visar att vi kan räkna med 3,2–3,5 % TS i tunnfasen om vi inte betonar hög TS på fastfasen. Avvattningsförsöken i Danmark med GEA-centrifug har resulterat i att det uppnåtts en TS-halt på 2,7 % TS för tunnfasen (Sven Persson, pers. medd.).

Ammoniumkvävet i tunnfasen blev 4,1 kg/t mot 3,4 kg/t i fastfasen. När det gäller fördelningen av rötrestens ammoniumkväve blir resultatet tydligare. Baserat på TS-halterna blir fördelningen mellan tunnfas och fastfas 80:20. Rötrestens analys av ammoniumkväve under pilotkörningen visade på ca 5,8 kg NH<sub>4</sub>-N/t och minskningen härrör från den långa lagringen i IBC-behållare. Vi konstaterade också att locken inte varit påskruvade helt, eftersom efterrötning pågick när de magasineras och vi ville inte spräcka några behållare. Fördelningen av den lagrade rötrestens ammoniumkväve blev efter centrifugen sådan att 17 % blev kvar i fastfasen och 83 % återfanns i tunnfasen.

Fosforhalterna är dramatiskt mycket lägre i tunnfasen och därför kan givan vid gödsling med tunnfas ökas mycket innan fosforgränsvärdet 22 kg/ha uppnås, samtidigt som kvävegivan kan hållas hög. Fördelningen av rötrestens fosfor blir 79 % till fastfasen och 21 % till tunnfasen, baserat på TS-fördelningen.

## 4.2.2 Indunstning

Vid surgörningen av tunnfasen tillförts ca 2,5 viktprocent svavelsyra (96 %) vilket resulterade i pH-sänkning från 8,0 till 5,0. Det fanns en viss variation över satserna och det kunde bero på olika mängd suspenderat material i satserna. Vid tillförseln av svavelsyra sågs skummet växa mycket snabbt och stegvis i takt med membranpumpens pulserande tillförsel av svavelsyra. Ingen analys gjordes på den gas som bildades vid surgörningen av tunnfasen men hypotesen är att utgjordes av koldioxid. Skumdämparåtgången vid surgörningen blev 0,15 kg/ton tunnfas,

Surgörningen var en tidskrävande process som tog mer än 1 h per surgjord sats. Det konstaterades också att volymen hos den surgjorda vätskan var ca 20 % större än innan surgörningen påbörjades. Troligen orsakades detta av mikroblåsor av gas som inte upplöstes förrän efter en tid. Fler praktiska erfarenheter finns redovisade i Bilaga 2.

Indunstningen drevs huvudsakligen vid 65 °C men periodvis testades även en drifttemperatur på 80 °C.

I tabell 4:7 redovisas den kemiska sammansättningen på ett koncentrat som genererats vid indunstning av tunnfasen. Indunstningen medförde att koncentratet hade 3,0–3,8 ggr högre koncentration av fosfor, kalium och andra mineraler samt kol än motsvarande koncentration i tunnfasen. Mängden producerad koncentrat efter indunstningen utgjorde ca 26 % av mängden tillfört vätvikt till indunstaren (inkluderar vikten på svavelsyran som tillfördes för surgörning).

Tabell 4:7. Kemisk sammansättning på koncentrat efter indunstning av tunnfas genererad vid centrifugeringen. Analysen genomförd av Agrilab.

	Koncentrat	
TS	20,7	% av våtvikt
VS	72,7	% av TS
Totalkväve	20,2	kg/ton
Organiskt kväve	5,0	kg/ton
Ammoniumkväve	15,2	kg/ton
Total kol	35	kg/ton
Total fosfor	1,7	kg/ton
Total kalium	16,4	kg/ton
Total magnesium	0,2	kg/ton
Total kalcium	2,8	kg/ton
Total natrium	2,1	kg/ton
Total svavel	23,8	kg/ton

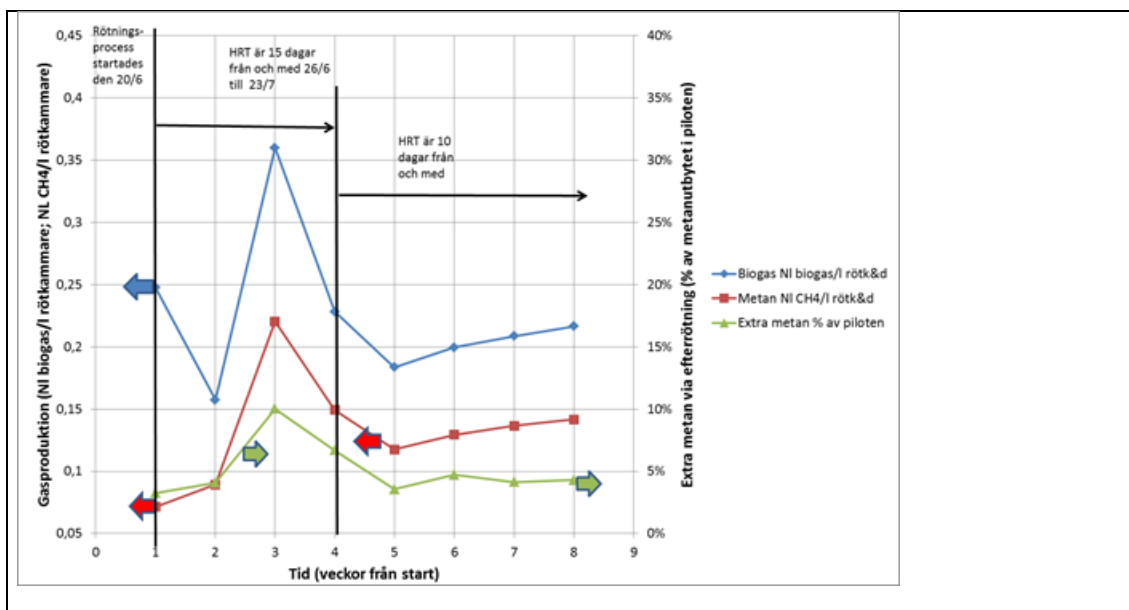
Det genomfördes en titrering av färsk biogödseln liksom den tunnfas som erhöles med en laboratoriecentrifugering få fram åtgången av svalesyra inför planeringen av indunstningsförsöket. Titrering:

- på biogödsel för att sänka pH-värdet från 8,17 till 4,4 motsvarande en syratillsats på 0,247 mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/kg biogödsel, se bilaga 2.
- på tunnfas för att sänka pH-värdet från 8,20 till 4,32 motsvarande en syratillsats på 0,1855 mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/kg tunnfas, se bilaga 2.

## 4.3 AP 3 - Laboriestudie

### 4.3.1 Kontinuerlig efterrötning

Den semi-kontinuerliga efterrötningen av rötrest, genererad av piloten, gav ca 0,14 Nl CH<sub>4</sub>/l rötchammare dygn vid en hydraulisk uppehållstid på 10 dygn, figur 3. Detta motsvarar en specifik metanproduktion på ca 30 liter/ kg VS tillförd VS till efterrötchammaren. Halten metan var ca 65 % (volym). Efterrötningen gav en extra metanproduktion motsvarande ca 4 % av pilotrötningens produktion.



Figur 3. Gasproduktion vid kontinuerlig efterrötning av den rötrest som genererats under AP1.

Gasproduktionen var låg under den kontinuerliga efterrötningen varför den kemiska sammansättningen på inflödet och utflödet var relativt lika, se tabell 4:3 och tabell 4:9. TS- och VS-analyser som genomfördes under driftuppföljningen av efterröttkammaren indikerar dock att efterrötningen resulterade i att TS-halten sjönk ca 0,6 procentenheter liksom att VS-halten sjönk ca 1,4 procentenheter, se 4:8.

Tabell 4:8. Analyser genomförda under driftuppföljning av efterrötningen. Enheten för TS är % av våtvikt och för VS % av TS. Analyserna är genomförda av RISE, JoL.

	TS-medel	TS-min	TS-max	VS-medel	VS-min	VS-max
Inflöde efterröttkammare	6,9	6,85	6,97	67,6	66,9	68,3
Utflöde efterröttkammare	6,3	6,1	6,6	66,2	65,4	67,5



Tabell 4:9. Kemisk sammansättning på rötrest avslutning av kontinuerlig efterrötning. Analysen genomförd av Agrilab.

	Rötrest vecka 8	
TS	7,0	% av våtvikt
VS	68,1	% av TS
Totalkväve	7,6	kg/ton
Organiskt kväve	2,1	kg/ton
Ammoniumkväve	5,5	kg/ton
Total kol	27,2	kg/ton
Total fosfor	1,29	kg/ton
Total kalium	4,35	kg/ton
Total magnesium	0,59	kg/ton
Total kalcium	2,87	kg/ton
Total natrium	0,56	kg/ton
Total svavel	0,73	kg/ton

### 4.3.2 Bestämning av restgaspotential

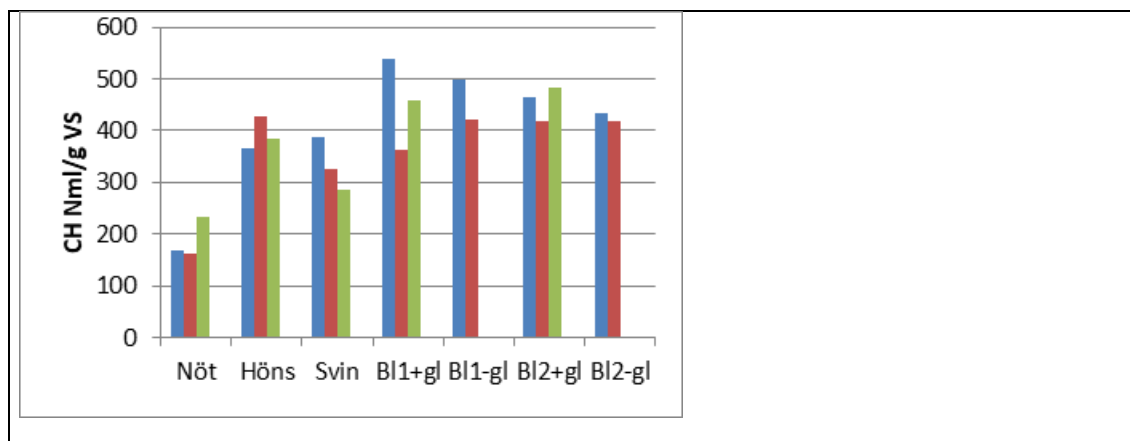
Restgaspotentialen hos rötrest från:

- pilotrötningen var ca 75 Nl CH<sub>4</sub> /kg VS
- den semi-kontinuerliga efterrötningen 45–50 Nml CH<sub>4</sub>/g VS.

Restgaspotentialen hos rötresten efter den semi-kontinuerliga efterrötningen motsvarar ca 10 % av metanpotentialen hos de blandningar som undersöktes i BMP försök.

### 4.3.3 Bestämning av biogaspotential

Resultatet av BMP försöket visas i figur 4, metanpotentialen för nötflytgödseln var ca 170 Nml/g VS medan den var betydligt högre för höns och svingödseln ca 380 respektive 325 Nml/g VS. Högst potentialer erhöles för blandningarna ca 450 Nml/g VS. Metanproduktionen från ympen är borträknad i resultaten. Den relativt stora spridningen mellan replikaten beror troligen på att ympen var något inhomogen och att den innehöll relativt höga VFA-koncentrationer.



Figur 4 BMP för några delsubstrat och substratblandningar, se tabell 3:5.

## 5 Tolkningar av resultaten

### 5.1 Massbalans och växtnäringsfördelning

I tabell 5:1 redovisas en massbalans som är en tolkning av resultaten från rötning-, centrifugerings- och indunstningsförsöken. Tolkningen baserar sig på att utflödet från rötningens omgående centrifugeras och genererad tunnfas också omgående surgörs och indunstras.

Tabell 5:1. Beräknad massbalans och fördelning mellan fosfor och kväve.

	Substrat	Rötrest	Fast fas	Koncentrat	Kondensat	
Viktandel	100%	93%	21%	19%	55%	% av substratet
N-tot/P	6,6	6,6	2,3	16,7	-	kg N-tot/kg P
NH <sub>4</sub> -N/P	1,1	4,7	1,3	13,2	-	kg NH <sub>4</sub> -N/kg P
Andel av N-tot	100%	100%	30%	68%	1%	% av N-tot i substrat
Andel av NH <sub>4</sub> -N	19%	100%	23%	75%	2%	% av NH <sub>4</sub> -N röt rest
Andel av P	100%	100%	76%	24%	0%	% av N-tot i substrat

### 5.2 Växtnäringsinnehåll

I tabell 5:2 redovisas en beräknad kemisk sammansättning för den tunnfas och fast fas efter en direkt centrifugering av rötrest genererad av en röttningsprocess som drevs under samma substratblandning och betingelser som pilotanläggningen under AP1. Genererad tunnfas surgörs omgående med 22 kg 96 % svavelsyra/ton tunnfas och därefter indunstras. Av den ammoniumkväve som tillförs indunstaren via tunnfasens antas 97,5 % av ammoniumkvävet återfinnas i koncentratet.

Sammansättningen är en tolkning av resultaten från erhållna resultat under försöken.

Tabell 5:2. Beräknad sammansättning på fast fas respektive tunnfas efter centrifugering samt koncentrat efter indunstning.

	Fast fas	Tunnfas	Koncentrat	
TS	21	3,2	20	% av våtvikt
Totalkväve	10,5	7,2	27,2	kg/ton
Organiskt kväve	4,8	1,5	5,7	kg/ton
Ammoniumkväve	5,7	5,7	21,5	kg/ton
Total fosfor	4,5	0,4	1,6	kg/ton
Total kalium	4,4	4,4	14,7	kg/ton
Total svavel	1,8	0,4	22,6	kg/ton

### 5.3 Värmebehov för uppvärmning

Värmebehovet E (i kWh) har beräknats för uppvärmning av en substratblandning med vikten m (anges i kg) och TS-halten  $TS_b$  (anges i %) enligt ekvationen:

$$E = m * (4,18 * (100\% - TS_b) + 1,6 * TS_b) * (t_1 - t_2) / 3600$$

Värmebehovet för en substratblandning, som antas ha en utgångstemperatur på 10 °C och med en TS-halt på 13,5 %, har beräknats för:

- rötning vid 37 °C till 28,7 kWh värme/ton substratblandning vilket motsvarar 0,89 kWh värme/Nm<sup>3</sup> producerad metan.
- hygienisering vid 70 °C till 63,9 kWh värme/ton substratblandning vilket motsvarar 1,99 kWh värme/Nm<sup>3</sup> producerad metan.

Dessa beräknade värmebehov inkluderar ej:

- a) det värmebehov som behövs för att täcka de värmeförluster som uppkommer i anläggningen
- b) möjligheten att använda återvunnen värme från hygieniserat substrat, rötrest eller från gasuppgradering/gaskomprimering för uppvärmning av rötningsprocess/hygieniseringsteg.

### 5.4 Elbehov för indunstning

Om elbehovet för att driva en MVR-indunstare antas vara 25 kWh el/ton förångat vatten medför det att elbehovet blir 0,43 kWh el/Nm<sup>3</sup> producerad metan om 74 % av tillförd våtvikt till indunstaren förångas och att därmed produktionen av gödselkoncentrat blir resterande 26 viktprocent.

## 5.5 AP 4 - Analys av den förädlade biogödselns växtnäringsvärde och funktion

Utgående från arbetet i AP 1 och AP2 har det presenterats 4 olika gödselmedel med stor skillnad på växtnäringskoncentration och relation mellan de olika näringsämnen, se tabell 4:3 och 5:2. Analysen av växtnäringsvärden utgår ifrån innehållet av kväve, fosfor, kalium och svavel även om de andra mikronäringsämnen också har ett värde. Det kan också finnas ett värde i att sprida organisk gödsel på en växtodlingsgård som bara brukar använda mineralgödsel, men det värdet får man lägga ovanpå växtnäringsvärdet.

### 5.5.1 Vaxtnäringsvärde

#### **Konventionell odling**

Vid konventionell odling har växtnäringsvärdet  $VV_k$  beräknats till:

- Ca 120 kr/ton för biogödseln, se tabell 5:3. Gödselmedlet är att betrakta som ett kombinerat kväve-, fosfor- och kaliumgödselmedel där kvävet bidrar med 47 % av växtnäringsvärdet, fosfor 29 % och kaliumet 23 %.
- Ca 100 kr/ton för tunnfasen, se tabell 5:3. Gödselmedlet är att betrakta som ett kombinerat kväve- och kaliumgödselmedel där kvävet bidrar med 56 % av växtnäringsvärdet och kaliumet 35 %.
- Ca 190 kr/ton för fastfasen, se tabell 5:3. Gödselmedlet är att betrakta som en kombinerad fosfor, kväve- och kaliumgödselmedel där fosfor bidrar med 48 % av växtnäringsvärdet, kvävet 30 % och kaliumet 19 %.
- Ca 450 kr/ton för koncentratet, se tabell 5:3. Gödselmedlet är att betrakta som ett kombinerat kväve-, kalium och svavelgödselmedel där kvävet bidrar med 47 % av växtnäringsvärdet, kaliumet 26 % och svavlet med 20 %.

Tabell 5:3. Egenskaper och växtnäringsvärde av biogödseln och tre processade produkter räknat utifrån förutsättningar för konventionell odling ( $Vv$ ) och ekologisk odling ( $VV_e$ ). växtnäringsseffekt av kväve ( $E_N$ ).

	Biogödsel	Tunnfas	Fastfas	Koncentrat
TS (%)	7,0	3,2	21,0	20,0
TN (%)	0,79	0,72	1,05	2,72
P (%)	0,14	0,04	0,45	0,16
K (%)	0,44	0,44	0,44	1,47
S (%)	0,06	0,04	0,18	2,26
N/P	6	17	2	17
$E_N$ (%)	75	79	54	79
$VV_k$ (kr/t)	123	102	189	455

## Ekologisk odling

Vid konventionell odling har växtnäringsvärdet beräknats till:

- 340–348 kr/ton för biogödseln beroende på metoden för att värdera växtnäringsvärdet, se tabell 5:4. Detta medför att gödselmedlet med dessa värderingsmetoder har 2,8 ggr högre värde vid ekologisk växtodling än vid konventionell.
- 297–317 kr/ton för tunnfasen beroende på metoden för att värdera växtnäringsvärdet, se tabell 5:4. Detta medför att gödselmedlet med dessa värderingsmetoder har 2,9–3,1 ggr högre värde vid ekologisk växtodling än vid konventionell.
- Ca 463–507 kr/ton för fastfasen beroende på metoden för att värdera växtnäringsvärdet, se tabell 5:4. Detta medför att gödselmedlet med dessa värderingsmetoder har 2,4–2,7 ggr högre värde vid ekologisk växtodling än vid konventionell.
- 1198–1579 kr/ton för koncentratet beroende på metoden för att värdera växtnäringsvärdet, se tabell 5:4. Detta medför att gödselmedlet med dessa värderingsmetoder har 2,6–3,5 ggr högre värde vid ekologisk växtodling än vid konventionell.

Tabell 5:4. Vaxtnäringsvärde för biogödseln och tre processade produkter räknat utifrån förutsättningar för ekologisk odling med två olika värderingsmetoder, dels när gödselmedlen enbart värderas efter sitt innehåll av totalkväve då kväve värderas till 44 kr/kg TN ( $VV1_e$ ), dels värderat samlade värdet av alla makronäringsämnen till 24 kr/kg NPKS ( $VV2_e$ ). Vaxtnäringsvärde jämförs sedan med motsvarande värdering vid konventionell odling.

	Biogödsel	Tunnfas	Fastfas	Koncentrat
Kväve-värdering (kr/kg TN)	42	42	42	42
$VV1_e$ (kr/t)	348	317	463	1198
ggr högre värde än $VV_k$	2,8	3,1	2,4	2,6
NPKS-mängd (kg/ton)	14,4	12,4	21,2	66,1
NPKS-värdering (kr/kg NPKS)	22	22	22	22
$VV2_e$ (kr/t)	340	297	507	1579
ggr högre värde än $VV_k$	2,8	2,9	2,7	3,5

Biogödseln i denna studie har ett ganska högt värde mest eftersom kvävehalten är relativt högt. Den höga fosforhalten gör att den ändå har en låg N/P förhållande som är mycket lägre än de flesta växternas behov och det begränsar möjligheten att utnyttja kvävet. Förädling av biogödseln lyckades separera större delar av fosfor till fastfasen och därmed minskade fosforkoncentration i tunnfasen med 69 %. Med en N/P förhållande av 17 kan man sprida tunnfasen efter kvävebehovet utan att överskrida tak på fosfortillförsel. Samma N/P förhållande fanns med i koncentrat fast på 3,8 gånger högre koncentration. Genom att blanda biogödsel och tunnfas eller koncentrat finns potential att kunna skräddarsy gödselmedel med olika N/P förhållande och koncentrationer för att anpassa sig till grödan som ska gödslas eller kompensera för längre transportavstånd. Fastfasen blir en bra fosfor- och jordförbättringsgödselmedel med en N/P förhållande på 2, men eftersom TS-halten bara är 21 % finns det fortfarande mycket vatten som ska transporteras och spridas, och det skulle säkert vara önskvärt att öka TS-halten.

Växtnäringsvärden av tunnfasen är lägre än biogödseln hur man än räknar ( $VV_k$ ,  $VV1_e$  eller  $VV2_e$ ). Detta är mest på grund av minskade fosfor halt med centrifugering men även totalkväve halten minskade med 9 % i tunnfasen därav det mesta var organiskkväve (TN minus  $\text{NH}_4\text{-N}$ ). Men, även om växtnäringsvärde är mindre i tunnfasen efter centrifugering har den en högre gödslingsvärde än biogödseln. Ta till exempel höstvetete som har en förväntat skörd på 8 t/ha och gödslingsrekommendation på 180 kg kväve och 15 kg fosfor per hektar (Jordbruksverket 2017). Om man begränsar spridningen till växternas behov är det fosfor som begränsar givan och spridningsgivan blir 11 t/ha. Detta tillför bara 88 kg TN/ha men man får sprida 25 t/ha tunnfas och därmed tillför 180 kg TN/ha. Gödslingsvärden av biogödseln blir i så fall ungefär 3800 kr/ha för ekologisk odling medan tunnfasens värde ligger runt 7425 - 7925 kr/ha beroende på hur man räknar ( $VV1_e$  eller  $VV2_e$ ).

## 5.5.2 Bedömning av kväveeffekt

Kväveeffekten hos organiska gödselmedel beror på egenskaper hos gödseln, spridningsteknik, väderlek och gröda. Kväveeffekten beskrivs oftast i förhållande till mineralkväve som sätts till 100 % och effekten av organiskt gödselmedel anges då i relation till det.

I biogödseln och de förädlade produkterna föreligger kvävet både i form av ammoniumkväve och organiskt bundet kväve. Ammoniumkväve antas ha lika hög effekt som mineralkväve och kan snabbt tas upp av en växande gröda, medan det tar tid för det organiska kvävet att mineraliseras och bli växttillgängligt i omvandlingsprocesser i marken som kan ta allt från någon vecka till 5–10 år (Delin m.fl., 2010; Salomon m.fl., 2013). En nackdel med ammoniumkväve är att det finns risk för ammoniakavgång under lagring och spridning och det minskar kväveeffekten. Biogödsel, tunnfas och koncentrat har alla relativt hög andel ammoniumkväve av totalkväve (tabell 5:5) och därmed potential för hög kväveeffekt, under förutsättning att det vitas åtgärder för att minimera ammoniakförluster. Fastfasen har också en relativt hög andel ammoniumkväve, men det resulterar troligen också i högre ammoniakförluster under lagring och spridning än vad som är fallet för fastgödsel.

Gödselns kol/kväve-kvot har visat sig ge en bra prognos på effekten av organiskt kväve, ju lägre kol/kväve-kvot, desto högre kväveeffekt (Delin m.fl., 2014). Tunnfasen och koncentratet har en kol/kväve-kvot på 1,5 (se tabell 5:5) som skulle leda till en ungefärlig kväveeffekt på 80 % enligt Delin m.fl. (2014), under förutsättning att man undviker signifikant ammoniakavgång. Det finns liten risk för ammoniakavgång från koncentratet eftersom pH är så lågt. Även tunnfasen bedöms ha liten risk för ammoniakavgång trots sin höga pH-värde, eftersom TS-halten är låg och liten partikelstorlek vilket båda gynnar infiltrering ner i marken där ammoniumet binds fast i jordkolloiderna. Biogödseln med en kol/kväve-kvot på 3,4 skulle ha en kväveeffekt på ungefär 70 %, men risken för ammoniakavgång under spridning blir betydligt större än för vanliga biogödsel eftersom den har en mycket högre TS-halt som försvårar infiltrering. Fastfasen har en ännu högre kol/kväve-kvot som sänker kväveeffekten och dessutom är risken hög för ammoniakförluster som därmed skulle minska kväveeffekten. Samtidigt är fastfasen tänkt huvudsakligen som ett fosforgödselmedel.

Tabell 5:5. Biogödselns och förädlade produkternas totala kväveinnehåll (TN), andel ammoniumkväve av totalkväve (NH<sub>4</sub>-N/TN), kol/kväve-kvot, och ungefärlig kväveeffekt ( $E_N$ ) baserade på kol/kväve-kvot enligt Delin m.fl. (2014). Antal stjärnor (\*) indikerar uppskattad riskminskning av  $E_N$  på grund av ammoniakavgång under lagring och spridning.

	Biogödsel	Fastfas	Tunnfas	Koncentrat
TN (kg/t)	7,9	10,5	7,2	27,2
NH <sub>4</sub> -N / TN	75%	54%	79%	79%
C/N	3,4	ca 7,5	ca 1,5	ca 1,5
$E_N$	70%**	50%***	80%*	80%

Förädling av biogödseln ökade den potentiella kväveeffekten av både tunnfasen och koncentrat samtidigt som risken för ammoniakavgång minskade betydligt. Metoden för att beräkna kväveeffekt visade ingen större skillnad i resultat.

### 5.5.3 Lagring

Risken för förluster av ammoniumkväve vid lagring av biogödseln, tunnfasen och fastfasen blir stor på grund av att de har hög pH. Troligtvis kommer tunnfasen och biogödseln dessutom att ha svårt att bilda en stabil svämtäcke som bara ökar risken för ammoniakavgång ännu mer. All minska risk för förlust av ammoniumkväve under lagring kommer det att vara kritiskt att täcka lagern eller alternativt surgör även biogödseln och tunnfasen innan lagring. Täckning är rekommenderat även för fastfasen. Risk för ammoniakavgång vid lagring av koncentrat på grund av låg pH borde vara minimalt även utan täcke. Surgörningen som gjordes innan indunstning kommer också att minimera risken för metanbildning vid lagring av koncentrat (Rodhe m.fl., 2018).

### 5.5.4 Spridningsteknik

Det är grundläggande för en bra gödselspridare att kunna få ut rätt mängd gödsel på rätt plats med jämn fördelning över arbetsbredden och där automatisk anpassas efter körhastigheten. Det finns tre tekniker för spridning av flytgödsel: bredspridning, bandspridning och myllning.

Bredspridning av flytgödsel bör avvecklas eftersom tekniken leder till hög ammoniakavgång om man inte brukar ner det omedelbart, vilket oftast är svårt av logistiska skäl. Dessutom är det svårt att med bredspridning få en jämn fördelning av gödsel över arbetsytan som leder till ojämn fördelning av växtnäring. Vid bandspridning lägger man gödseln på markens yta i band via en ramp med slangar som släppas längs marken. Bandspridning av flytgödsel med släppslangsteknik är den vanligaste spridningsteknik i Sverige idag eftersom det minskar ammoniakavgång jämfört med bredspridning och den levererar en jämn fördelning av gödsel över arbetsbredd. Flytgödseln i tanken pumps till en fördelare som fördelar gödseln jämnt mellan alla slangar längs rampens bredd. Nedmyllning av gödsel är en känd teknik för att förhindra ammoniakavgång och dålig lukt, men har som nackdelar att arbetsbredden är small och det kräver mer dragkraft av traktorn.

Bredspridning är den enda teknik som finns för fastgödsel medan det finns en del olika teknik på själva spridaren. En allmän nackdel med fastgödelspridning är att de oftast har svårt att ge en jämn fördelning av fastgödslin över arbetsytan, men mycket av det kan också bero på strukturen av själva fastgödslin. Tvåstegsspridare sönderdelar och sprider gödslin jämnare än andra teknik. Det är viktigt också att det finns automatiskt regelsystem för att anpassa givan till körhastigheten.

### ***Biogödsel***

För konventionell växtodling av höstveten utan förrådsgödsling av fosfor har biogödselgivan beräknats till dryga 11 ton/ha, (15 kg P/ha, se bilaga 3). Det går tekniskt att sprida biogödseln med en vanlig flytgödelspridare, men vanliga flytgödelspridare anses ej vara dimensionerad för detta låga flöde och det finns risk att spridaren ej ger jämn fördelning över arbetsbredden. Om spridarens pump klarar låga givor kan man möjligtvis stänga av en del slangar och minska arbetsbredden av släppslangsrampen med nackdelen att det blir flera körning på fältet. Alternativt kanske en modifiering av fördelaren skulle tillåta jämn fördelning vid låga givor. Med förrådsgödsling av fosfor (22 kg P/ha, se bilaga 3) blir givan 16 ton/ha som är troligtvis på det nedre gräns för jämn spridning och vilket de flesta spridare borde kunna klara av. Om gödsling med biogödsel istället anpassas till maxgivan för nitratkänsliga området (180 kg N/ha, se bilaga 3) blir givan ca 23 ton/ha vilket ger ett tillräckligt högt flöde för att erhålla ett jämnt spridningsresultat.

En myllningspridare skulle vara bra för biogödsel med tanke på att det finns hög risk för ammoniakavgång. Arbetsbredd på myllningsaggregat är redan mycket mindre än släppslangsramp så det blir säkert pumpen som avgör om den klarar av låga givor på jämnflöde. Själva flödesmätare kan också ibland ha svårt med givor som är mycket lägre än det de är kalibrerad till.

Bredspridning av rötrest rekommenderas inte eftersom kväveförluster kan förväntas bli höga med tanke på pH-värdet och hög andel ammoniumkväve.

### ***Tunnfas***

Bandspridning av tunnfasen med en vanlig flytgödelspridare ska inte vara något problem och givorna är lätt inom vanliga gränser för flytgödsel. TS-halten av tunnfasen är så lågt och partikelstorleken så liten att den troligtvis kommer att snabbt infiltrera ner i marken och minska risken för ammoniakavgång, men om man är orolig för förluster borde myllningsutrustning fungera utan problem också. Vid en tunnfasgiva på dryga 25 ton/ha sprids 180 kg N-tot/ha (och 10 kg P/ha). Genom att blanda biogödsel och tunnfas innan spridning skulle man kunna anpassa N/P förhållande till just den gröda man ska gödsla och samtidigt lägga givor anpassade för vanliga bandspridare för flytgödsel.

### ***Koncentrat***

Utifrån TS-halten på 20 % skulle konzentratet normalt klassas som klet- eller fastgödsel men eftersom fraktionen dels saknar större partiklar, dels att den tillförda svavelsyra (vid surgörningen) också bidra till torrsubstansen blir konzentratet lättflytande och den bedöms gå att pumpa med traditionella gödselpumpar. Inför test av spridningsutrustning rekommenderas dock att karakterisera konzentratets fysikaliska egenskaper som t.ex. viskositetsmätning. Vid en konzentratgiva på 6,6 ton/ha sprids 180



kg N-tot/ha (och 10 kg P/ha). Bedömningen är att spridning med traditionell flytgödselspridningsutrustning för koncentratet ej kommer uppfylla kravet på jämn fördelning över arbetsbredden. Den enklaste lösningen är då att koncentratet används för att spetsa flytgödsel, och få en flytgödsel med högre växtäringsinnehåll. Ett annat alternativ är att spä ut koncentratet med vatten i samband med spridning, men det skulle kräva mycket vatten. En tredje lösning kan vara att modifiera en flytgödselspridare för att kunna leverera jämna givor. En till möjlighet är att testa ett alternativt ekipage för spridning av koncentratet, som t.ex. Cameleon-systemet, som kan vara intressant för spridning av startgivor i samband med sådd. Det kan också vara värt att bygga en specialspridare men rätt dimensionerad pump, fördelaren och mindre storlek på tankvagnen som därmed minskar risken för markpackning som är ett vanligt bekymmer med stora flytgödseltankar som normalt används.

### ***Fastfas***

Fastfasen har ett relativt höga innehåll av växtnäring (2–3 ggr högre än nöt- och svinfastgödsel) som ställer höga krav på jämn spridning och exakt dosering. Utifrån TS-halten på 21 % klassas fastfasen på gränsen mellan klet- och fastgödsel, men konsistensen liknar mer som kletgödsel och det kommer att försvåra finfördelningen och spridning.

Utan förrådsgödsling av fosfor har fastfasgivan beräknats till dryga 3 ton/ha, (15 kg P/ha). Bedömningen är att traditionell fastgödselspridare ej kommer att uppfylla kravet på jämn fördelning över arbetsbredden och att det behövs minst 3 ggr större fastgödselgiva för att traditionell fastgödselspridare ska ge godtagbar jämnhet.

Eftersom fastfasen har en relativt hög andel ammoniumkväve finns stor risk för förluster efter spridning. Därför rekommenderas att den brukas ner så fort som möjligt efter spridning.

Konsistensen av fastfasen kommer att försvåra en jämn spridning av produkten över arbetsytan. Med tanke på det rekommenderas att fastfasen behandlas ytligare för att framställa en mer lämplig produkt att använda. Till exempel, med torkning till 90 % TS skulle man öka fosforhalten från 0,45 % till 1,93 % och då är pelletering en möjlighet.

## **6 Diskussion**

### **6.1 Rötning**

Den metod som använts för att kontrollera denna rötningsprocess med högt kväveinnehåll bygger på erfarenheter från rötning av kycklinggödseldominant substratblandning i laboratorieskala (Edström m.fl., 2013b). Vid dessa laboratorieförsök gick det att erhålla en stabil rötningsprocess som drevs vid 37 °C och en ammoniumhalt på dryga 5 g/l med en volymetrisk metanproduktion på 0,8 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> röt-kammare och dag. En viktig faktor för att uppnå en stabil rötningsprocess visade sig vara att tillföra järnklorid till röt-kammaren för att hålla biogasens svavelvätehalt vid ca 300 ppm. Rötningsprocessen drevs vid 35 dagars uppehållstid och en belastning av 4,3 kg VS/m<sup>3</sup> röt-kammare och dag. Ammoniuminnehållet i den gödselblandning som rötades var ca 20 % av total kväveinnehållet för att öka till 65 % av totalkvävet för den producerade rötresten.

Detta kan jämföras med försöksrötningen i detta projekt i pilotskala där det också tillfördes järnklorid till röt-kammaren, men i detta fall valdes att styra tillsatsen så att biogasens svavelvätehalt var ca 100 ppm (lämplig nivå om biogasen ska uppgraderas till drivmedel). Under pilotrötningen, som drevs vid 37 °C, var också rötningssprocessen stabil vid ammoniumhalt på närmare 6 g/l med en volymetrisk metanproduktion på 1,1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> röt-kammare och dag. Rötningssprocessen drevs vid 29 dagars uppehållstid och en belastning av 3,8 kg VS/m<sup>3</sup> röt-kammare och dag. Ammoniuminnehållet i den gödselblandning som rötades var också ca 20 % av totala kväveinnehållet för att öka till dryga 70 % av totalkvävet för den producerade rötresten. Det kan alltså konstateras att det finns många likheter mellan de två rötningssförsöken där kycklinggödsel respektive höns-gödsel var huvuds-substrat.

Det finns även skillnader som att höns-gödseln är mer lättomsättbar än kycklinggödseln. Detta kan exemplifieras med högre specifikt metanutbyte för höns-gödsel vid satsvisa utrötningss-försök som i detta projekt uppgick till ca 380 Nl CH<sub>4</sub>/kg VS, vilket kan jämföras mot kycklinggödsel där Edström m.fl. (2013a) uppnådde ca 200 Nl CH<sub>4</sub>/kg VS. Detta medför i sin tur att VS- och TS-reduktionen vid rötning av kycklingdominanta gödselblandningar är väsentligt lägre än vid rötning av höns-gödseldominanta. Som en konsekvens av detta blir TS-halten i röt-kammaren högre för en process som har kycklinggödsel som huvuds-substrat (ca 13 %, Edström m.fl., 2013b) än när höns-gödsel utgör huvuds-substratet (ca 7 % i detta projekt). En annan konsekvens är att gasutbytet vid ett efterrötningsssteg blir lägre för höns-gödseldominanta substratblandningar (ca 4 % i detta projekt) än för kycklinggödseldominanta (ca 15 % extra metanutbyte vid en 10 dagars satsvis restgaspotentialbestämning, Edström m.fl., 2013b). Denna skillnad beror huvudsakligen på att kvarvarande mängd VS i rötresten i detta projekt (dvs. rötrest från pilot-försöket) var mindre än hälften än i den rötrest som erhöles efter försöksrötning med kycklingdominant substrat.

Det kan konstateras att 3 månader efter ympning var rötningssprocessen stabil. Den klarade då av en stor variation i daglig tillförsel av fastgödsel och slurry, vilket resulterade i att den dagliga variationen i gasproduktion som mest kunde vara 20 % kring vecko-medelvär-det.

Torrsubstansen på slammet i röt-kammaren bestod till 68% av partiklar mindre än 0,5 mm vilket gör detta slam mer finpartikulärt än motsvarande partikelstorlek på röt-kammarinnehåll för gårdsbiogasanläggningar som huvudsakligen rötar flytgödsel (Olsson, 2014). Vidare visade viskositetsmätningen att röt-kammarinnehållet var icke-newtonskt med ett n-värde på 0,456 för potensekvationen exponent vilket medför att röt-kammarinnehållet har skjuv-tunnande egenskaper. Detta exponentvärde ligger högre vad som är normalt för rötningssprocesser som rötar flytgödsel (Olsson, 2014). Viskositetsmätningen gav ett värde på flödeskonsistensen K på 0,284 vilket låg lägre än de värden som Olson (2014) redovisade för rötad flytgödsel.

De viktigaste praktiska erfarenheter från rötningen i pilotskala var att:

- lager-behållare och utmatningssystem i en fullskala måste beakta att höns-gödseln både kladdar fast på roterande utmatningsskruvar samt att den lätt bygger valv i lager-behållare, vilket medför att gravitationen inte räcker till för att höns-gödseln skall falla ner i den botten-placerade utmatningsskruven.
- höns-gödseln innehåller mycket tunga partiklar som antagligen huvudsakligen består av den kalciumtillsats som hönsen får i sitt foder bl.a. för att bygga upp ett

bra äggskal. Erfarenheten från pilotförsöket var att detta sedimenterar i röt-kammare, lagerbehållare för rötrest och i rörledningar. Vidare torde dessa partiklar vid längre drift bidra till slitage på skärande utrustning, impellrar och rörledningar.

- de fjädrar som fanns i hönsgödseln återfanns ej i rötresten. Vidare observerades ingen ansamling av fjädrar på ytan i röt-kammaren.

## 6.2 Förädling av rötrest

Under centrifugeringen av rötresten uppnåddes mycket hög avskiljning av fosfor till den fasta fasen. En hypotes till uppnått resultat är att det tillfördes järnklorid till röt-kammaren som bundit in vattenlöslig fosfor i en partikulär förening som går att avskilja vid centrifugeringen. Möjligen har även den långa lagringen innan centrifugeringen bidragit.

Vid indunstningen beräknas ca 97 % av tunnfasens ammoniumkväve återfinnas i koncentratet och merparten av resterande 3 % återfanns i kondensatet. Vår hypotes är att ammoniumet förelåg i form av ammoniumsulfat efter surgörning av tunnfasen till pH 5 med svavelsyra. De låga kväveförlusterna kan förklaras med ammoniumsulfat inte drivs av vid de temperaturer på 60–80 °C som indunstaren drevs vid. Surgörning med svavelsyra innebär dock att betydande ökning av rötrestens svavelinnehåll. Detta riskerar leda till överdosering av svavel till åkermark. Långsiktigt behöver detta beaktas.

Det finns även andra slags indunstare än den eldrivna MVR-indunstare som testades i detta projekt. Exempel på en värmedriven indunstare är flashindunstare, vars värmebehov beror av hur många värmeåtervinningssteg de har. Utan värmeåtervinning är värmebehovet ca 700 kWh/ton förångat vatten, men via seriekoppling av flera förångningssteg med återvinning av ångbildningsvärme mellan stegen (kallas ofta MSF vilket står för multistage flash evaporator) sjunker värmebehovet ungefär omvänt proportionerligt mot antalet steg (Tamm m.fl., 2018). Exempelvis halveras värmebehovet till ca 350 kWh/ton förångat vatten för en indunstare med 2 steg och ner till ca 100 kWh/ton förångat vatten för en indunstare med 7 steg.

## 6.3 Biogödselvärdering

Uppförs en produktionsanläggning med liknande rötningskoncept och behandlingsteknik för rötresten genereras 4 st. gödselmedel med olika relationer gällande NPKS. Från Mönsterås Biogas planerade anläggning, som har den gödsel förädlingsteknik som testats i detta projekt, kan ca 75 % av allt ammoniumkväve återfinnas i huvudsakligen direktverkande kvävegödselmedel (i form av koncentrat efter indunstningen eller som tunnfas efter centrifugeringen). Lika hög andel fosfor går att återfinna i det fosforgödselmedel som genereras i form av fast fas efter centrifugering. Detta gör att det bättre går att styra kväve och fosforgödslingen av grödorna efter deras faktiska behov, vilket långsiktigt torde resultera i minskat läckage av dessa växtnäringsämnen från åkermark till vatten.

De gödselmedel som togs fram under detta projekt har en hög andel lättillgängligt kväve vilket är en viktig delförutsättning för att uppnå höga skördar vid växtodling. Baky m.fl. (2006) anger att:

- för spridning av flytande rötrest från matavfallsrötning har de i fleråriga fältförsök med havre och korn på våren vid sädd uppnått skördar motsvarande 72–105 % av den skörd där grödorna har gödslats med samma mängd mineralgödselkväve för kvävegivor i spannet 61–110 kg totalkväve/ha.
- sprida en startgiva med handelsgödsel i samband med vårsädd följt av spridning av flytande rötrest (från matavfallsrötning) i växande gröda har gett skördar som motsvarar 54–89 % av den skörd där grödorna har gödslats med samma mängd mineralgödselkväve för kvävegivor i spannet 84–98 kg totalkväve/ha.
- för spridning av fast rötrest efter fassetparation (matavfallsrötning) har de uppnått skördar motsvarande 65–80 % av den skörd där grödorna har gödslats med samma mängd mineralgödselkväve för kvävegivor i spannet 88–98 kg totalkväve/ha.

Wivestad & Nätterlund (2009) har vid försök med rötrest, hönsgödsel och Biofer 10-3-1 visat att med en giva på 100 kg totalkväve/ha lyckades värvete klara 12-procentspärren för proteinhalt för kvarnvetete med skördar på 4,5–4,8 ton/ha. Halverades denna kvävegiva gav det mindre skördar på 4,2–4,4 ton/ha men också lägre proteinhalt, vilket resulterade i att vetet klassades ner till fodervete. Försöken genomfördes på mark med medelstark förfrukt, och utan kvävegödsling var skörden 3,8 ton/ha.

Koncentratens ammoniumkväve torde huvudsakligen föreligga i form av ammoniumsulfat efter surgörning med svavelsyra innan indunstning. Ammoniumsulfat är ett direktverkande kvävegödselmedel och det finns mineralgödselmedel bestående av ammoniumsulfat (NS 21-24). Odlingsförsök med höstvetete som gödslat med ammoniumsulfat har gett samma skörd som ammoniumnitrat (N34) vid samma kvävegiva vid odlingsförsök med höstvetete (Yngveson, 2014; Nilsson, 2018).

Slutsatser från både Baky m.fl. (2006) och Wivestad & Nätterlund (2009) stödjer våra resultat att biogödseln och de tre förädlade produkter som beskrivs här har god potential för att leverera en hög växtnäringseffekt. Förhoppningen hos Biogas Mönsterås är att kunna få dessa gödselmedel godkända för ekologisk odling där det råder stor brist på denna typ av gödselmedel med högt innehåll av direktverkande kväve.

Det är viktigt att poängtera att biogödsel och produkterna fortfarande är ett lågt koncentrerat gödselmedel som består av vatten och mindre än 0,7–2,7 % kväve medan mineralgödsel består av 27–46 % kväve. Även pelleterade ekologiska gödsel ligger mellan 4 och 10 % kväve. Att transportera vatten är dyrt och gödslingskostnad för grödan måste också ta hänsyn till kostnaden för transport och spridning av de olika gödselprodukter. Samtidigt lyckades både centrifugering och indunstning ta fram gödselprodukter som är bättre anpassad till växternas behov med troligtvis ökad utnyttjande av kväve. Indunstning också lyckades ta bort onödiga vatten och koncentrera växtnäringen nästan 4 gånger högre än tunnfasen. Med en bra spridningsteknik kommer det att minska transportkostnader rejält och förlänga transportavståndet med behållen lönsamhet.

## 6.4 Lokalt och regionalt perspektiv

Biltrafiken i Kalmar län år 2016 hade en förbrukning av diesel på i medel 165 liter/person och år och bensin 318 liter/person år (www.scb.se). För Mönsterås kommun med ca 13 500 invånare medför detta att biltrafiken har ett fossilbaserat drivmedelsbehov på ca

60 GWh/år. Lokalt skulle alltså den planerade biogasanläggning i Mönsterås i framtiden kunna få en stor betydelse för att få kommunens invånare oberoende av fossila bränslen som drivmedel för persontrafiken.

Vid en jämförelse mellan ekologisk och konventionell odling av höstvetete var skördenivån för ekologiskt odlat höstvetete 59 % av de konventionella skördarna för området Götalands mellanbygder år 2016 (SCB, 2016c). Motsvarande för vårkorn var 67 % och höstraps 63 %. Samtidigt utgjorde totala kvävetillförseln till de ekologiska spannmålsgrödorna 2015/2016 70 % av kvävetillförseln till konventionella spannmålsgrödor (SCB, 2016b). Vad det gäller direktverkande kväve till ekologiska spannmålsgrödorna utgjorde dessa 39 % av direktverkande kvävetillförseln till konventionella spannmålsgrödor.

År 2016 var totalt 472 600 ha åkermark omställd i Sverige till ekologisk produktion varav det odlades spannmål på närmare 90 000 ha där ca 1/3-del utgjordes av höst- och vårvetete (SCB, 2016a). I Kalmar län odlades det ca 1 900 ha spannmål på omställd areal där höstvetete respektive vårkorn bidrar med dryga 500 ha vardera. Vidare odlas ca 130 ha raps på omställd mark varav dryga 100 ha utgör höstraps. I Kalmar utgör andelen åkermark med ekologisk odling dryga 10 % (JO 14 SM 1701) och betydande areaaler behöver ställas om för att uppnå Livsmedelsstrategin mål att 30 % av jordbruksmarken ska utgöras av ekologisk jordbruksmark år 2030.

En begränsande faktor för konventionella växtodlare liksom producenter av kyckling och slaktsvin att gå över till ekologisk produktion torde vara brist på godkända direktverkande gödselmedel. Bedömningen är, att om växtnäring som Mönsterås Biogas avser att producera, används på de gårdar som idag odlar spannmål och oljeväxter ekologiskt så skulle skördenivåerna kunna öka med 10 - 30 % mot dagens skördenivåer. Vidare skulle Mönsterås Biogas kunna tillhandahålla mer gödselmedel vars kväveinnehåll kan räcka till att växtnäringförsörja 2–3 ggr mer areal än vad som odlas ekologiskt med spannmål och rap.

Lantmännen har identifierat utmaningen att ekologiska produktionen i Sverige inte växer lika snabbt som konsumtionen (Eko 2017) och man ser en ökad efterfrågan på ekologisk spannmål till spannmålsfabrikerna liksom kvarnarna. Gödselmedel från Mönsterås Biogas planerade biogasanläggning kan alltså bidra till att matcha denna ökande efterfrågan men också påtagligt bidra till att jordbruket i Kalmar län med omnejd kan gå mot en hållbar intensifiering av livsmedelsproduktionen.

# Referenser

- APHA. 1995. Standard methods for the examination of Water and Wastewater. 19th edn, Am. Public Health Assoc.. Washington DC, USA.
- Baky A., Nordberg Å., Palm O., Rodhe L., Salomon E. 2006 Rötrest från biogasanläggningar – användning i lantbruket. JTI informerar nr 115. JTI-Institutet för jordbruks- och miljöteknik.
- Dahlberg C. 2010. Biogödsel förädling. Rapport SGC 221. Svenskt Gastekniskt Center.
- Delin S. 2008 Kvävemineralförlopp och inverkan på skörd efter gödsling med fjäderfågödsel. Stiftelsen Lantbruksforskning [www.lantbruksforskning.se](http://www.lantbruksforskning.se)
- Delin S., Engström L. 2010. Timing of organic fertiliser application to synchronise nitrogen supply with crop demand. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science. 60(1), 78-88.
- Delin S., Engström L. 2014. Att sprida organiska gödselmedel. Jordbruksinformation 9-2014. Jordbruksverket.
- Drosg B., Fuchs W., Seadi T.A. Madsen M., Linke B. 2015. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. ISBN 978-910154-16-8. IEA Bioenergy.
- Edström m.fl. 2013a. Rötning av fastgödsel vid Sötåsens gårdsanläggning. Slutrapport, projekt nr V1040066 till Stiftelsen Lantbruksforskning
- Edström m.fl. 2013b. Strategier för att effektivisera rötning av substrat med högt innehåll av lignocellulosa och kväve Projektnummer WR-61. ISSN 1654-4706 Waste Refinery.
- Eko 2017. Guide för tillväxt i ekologisk produktion. Lantmännen.
- ES 2017:07. Produktion och användning av biogas och rötrestar år 2016. Energimyndigheten.
- Hjort-Gregersen. 1998. Biogasfællesanæg. Økonomiske resultater og analyser. Statens Jordbrugs- og Fiskeriøkonomiske Institut, Danmark.
- Jansson L.-E. 2014. Ekonomisk utvärdering av biogasproduktion på gårdsnivå. Rapport i projektet "Utvärdering av biogasanläggningar på gårdsnivå. Hushållningssällskapens förbund.
- Jordbruksverket. 2017. Rekommendationer för gödsling och kalkning 2018. Jordbruksinformation 4 – 2017.
- Linnell A., Bergman B., Nätterlund H., Björsell P. 2016. Gödselmedel inför 2017. Ekobrevet 2016-11-11. Hushållningssällskapet.
- Luostarinen S. 2013a. Energy potential of manure in the Baltic Sea region -Biogas Potential& Incentives and Barriers for Implementation. [www.Balticmanure.eu](http://www.Balticmanure.eu).
- Nordgren P. 2014. Utvärdering av viskositet och omrörningsmetod vid olika gårdsbiogasanläggningar. Examensarbete. KTH. Kemiteknik.
- Olsson H. 2014. Utvärdering av viskositet och omrörningsmetoder vid gårdsbiogasanläggningar. Hushållningssällskapets Förbund 2014. [www.bioenergiportalen.se](http://www.bioenergiportalen.se)
- Rodhe L., Alverbäck A., Ascue J., Edström M., Nordberg Å., Pizzul L., Tersmeden M. 2018. Åtgärder för att minimera växthusgasutsläpp från lager med rötad och orötad gödsel. RISE Rapport 2018:18. ISBN: 978-91-88695-53-6 RISE Research Institutes of Sweden AB

- Rodhe L., Ascue J., Tersmeden M., Willén A., Nordberg Å., Salomon E., Sundberg M. 2013a. Växthusgaser från rötad och orötad gödsel vid lagring och efter spridning – samt bestämning av ammoniakavgång och skörd i vårkorn. Rapport 413, Lantbruk & Industri. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.
- Rodhe L., Delin S. Gustafsson K. 2013b. Surgörning av nötflytgödsel – effekt på ammoniakavgången vid spridning av rötad respektive icke-rötad gödsel i vall. Rapport från JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.
- Salomon E., Wivestad M. 2013. Rötrest från Jordbruket - återföring av växtnäring i ekologisk produktion. EPOK – Centrum för ekologisk produktion och konsumtion. SLU.
- Scanpump 2008. Agitation Handbook. Scanpump AB. Mölndal.
- SCB, Jordbruksverket, Naturvårdsverket och LRF 2012. Hållbarhet i svenskt jordbruk, ISBN 978-91-618-157hh0-8 SCB Tryck
- SCB. 2016a. Ekologisk växtodling 2016. JO 13 SM 1701.
- SCB. 2016b. Gödselmedel i Jordbruket 2015/16. MI 30 SM 1702.
- SCB. 2016c. Skörd för ekologisk och konventionell växtodling 2016. JO 14 SM 1701.
- Schnürer & Nordberg. 2008. Ammonia, a selective agent for methane production by syntrophic acetate oxidation at mesophilic temperature. Wat. Sci. & Technol., vol 57, no 5, 735-740.
- Tamm D., Edström M. Sindhøj E. 2018. Indunstning av biogödsel. Avfall Sverige 2018:05.
- Tybirk m.fl. 2013. Sustainable manure management in the Baltic Sea Region. [www.Balticmanure.eu](http://www.Balticmanure.eu).
- Wellinger 2013. The biogas handbook. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing
- Wivestad M., Nätterlund H. 2009. 100 kg kväve klarar proteingräns. Forskningsnytt om økologisk lantbruk i Norden nr 1. VäxtEko. SLU.
- Yngveson N. 2014. Olika kvävegödselmedel till höstvet. Sverigeförsöken, Växtnäring, HIR Malmöhus AB.
- Ögren E. 2016. Gödselmedel för ekologisk odling 2016, specialgödselmedel och stallgödsel. Jordbruksverket, Uppsala.

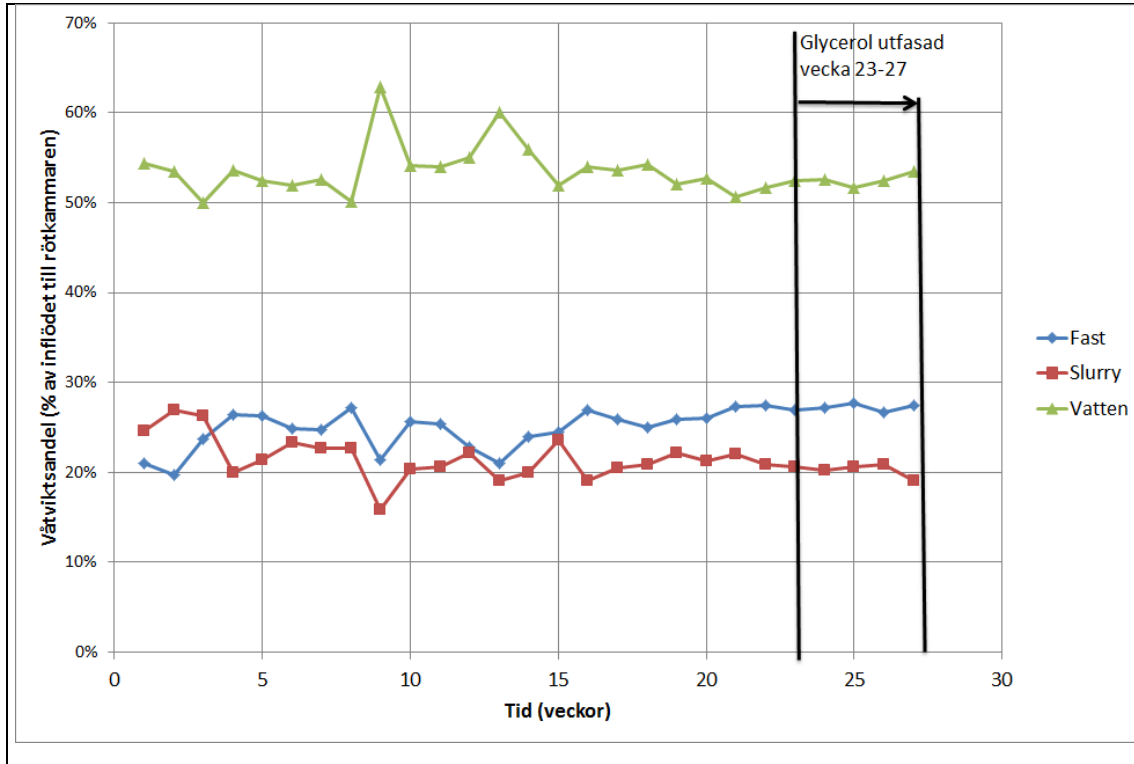
## Bilaga 1: AP1

Pilotens rötkammare ymp hämtades från Alvesta biogasanläggning vars ammoniumkvävehalt var 3,9 g/l. Substratblandningen som rötades var ca 26 vikt-% fastgödsel, 22 vikt-% slurry och 52 vikt-% spädvatten, se figur B1:1. Den initiala rötkammarbelastningen var 1,8 kg VS/m<sup>3</sup> & d och efter 4 veckors drift hade den ökats till 2,7 kg VS/m<sup>3</sup> & d (se figur B1:2). Järnklorid tillfördes så att H<sub>2</sub>S i biogasen låg i intervallet 100-200 ppm.

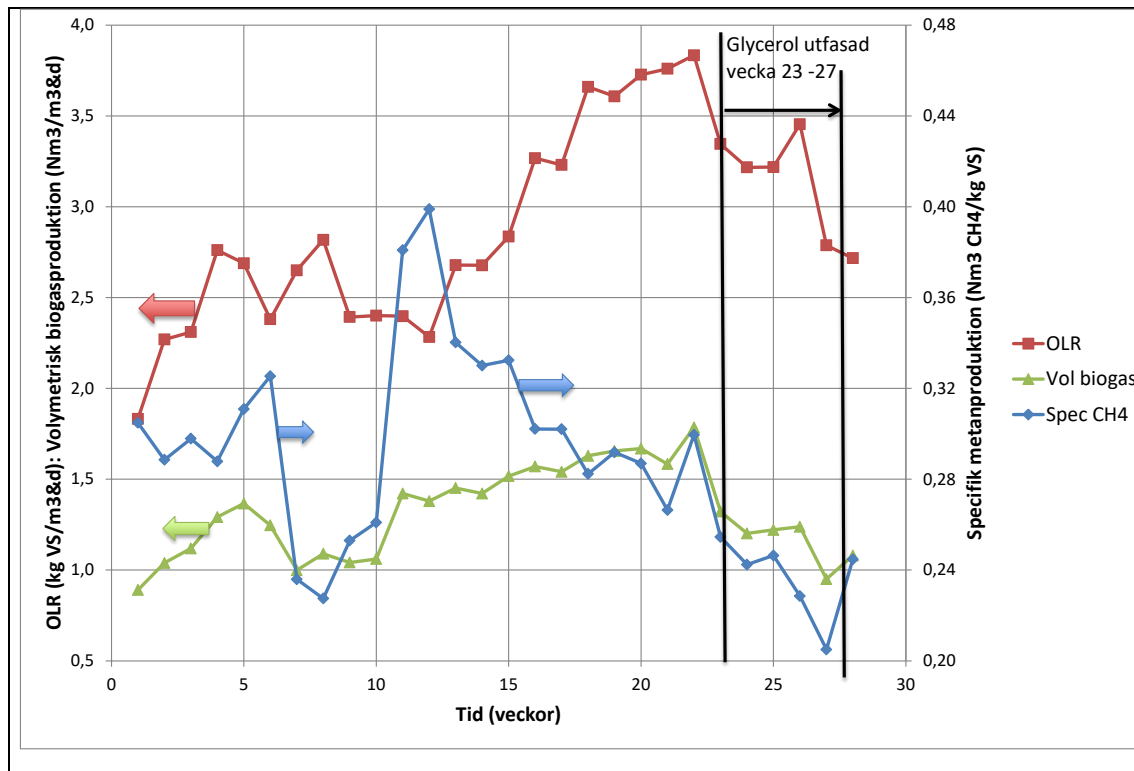
Den substratblandning som rötades under pilotförsöket var betydligt kväverikare än den blandning som Alvesta biogas rötar, varför ammoniumkvävehalten snabbt steg i rötkammaren under de 7 första driftveckorna med 9 tiondelar över ympens ammoniumkvävehalt. Efter 7 veckors drift sjönk den specifika metanproduktionen (figur B1:2) och flyktiga fettsyror ackumulerades i rötkammaren upp till ca 6 g/l (figur B1:3). För att stabilisera rötningsprocessen sänktes belastningen vecka 9 till 2,4 kg VS/m<sup>3</sup> & d liksom att vattenspädningen ökades för att bromsa ökningstakten av ammonium samt att tillförseln av järnklorid ökades så H<sub>2</sub>S i biogasen låg i intervallet 50-100 ppm.

Fettsyrorna fortsatte att öka för att vecka 11 nå 6 g/l (där 6 g/l utgjordes av acetat) liksom att ammoniumkvävet ökade med ytterligare 4 tiondelar. För att ytterligare försöka stabilisera processen togs ett beslut att öka vattenspädningen så att ammoniumhalten sänktes något och att spädningens anpassades så att ammoniumkvävehalten inte tilläts öka mer i rötkammaren. Därefter sjönk fettsyrorerna snabbt ner under 0,8 g/l samtidigt som specifika metanproduktionen ökade varför belastningen började ökas igen från och med vecka 13 fram till vecka 18 då en belastning på 3,7 kg VS/m<sup>3</sup> & d. Rötkammarinnehåll togs ut under denna period för att genomföra försök med den kontinuerliga efterrötningen i AP 3. Ammoniumkvävehalten var vid denna tidpunkt 6,1 g/l och TS-halten 7,1 %, se tabell 3:3. Därefter låg belastningen relativt konstant fram till vecka 23. Under perioden låg ammoniumkvävehalten stilla medan fettsyrorerna steg till 1,8 g/l där acetat utgjorde ca 60 % av fettsyrorerna. Från och med vecka 23 fasades glycerolen ut från substratblandningen vilket medförde en sänkning av belastningen till ca 3,2 kg VS/m<sup>3</sup> & d. Detta resulterade i att den volymetriska biogasproduktionen sjönk från ca 1,7 till 1,2 m<sup>3</sup> biogas/m<sup>3</sup> rötkammare & dag, se figur B1:2. Under veckorna 25-27 genomfördes tekniska test som påverkade substratblandningen varför gasproduktionsdata från denna period ej är representativ.

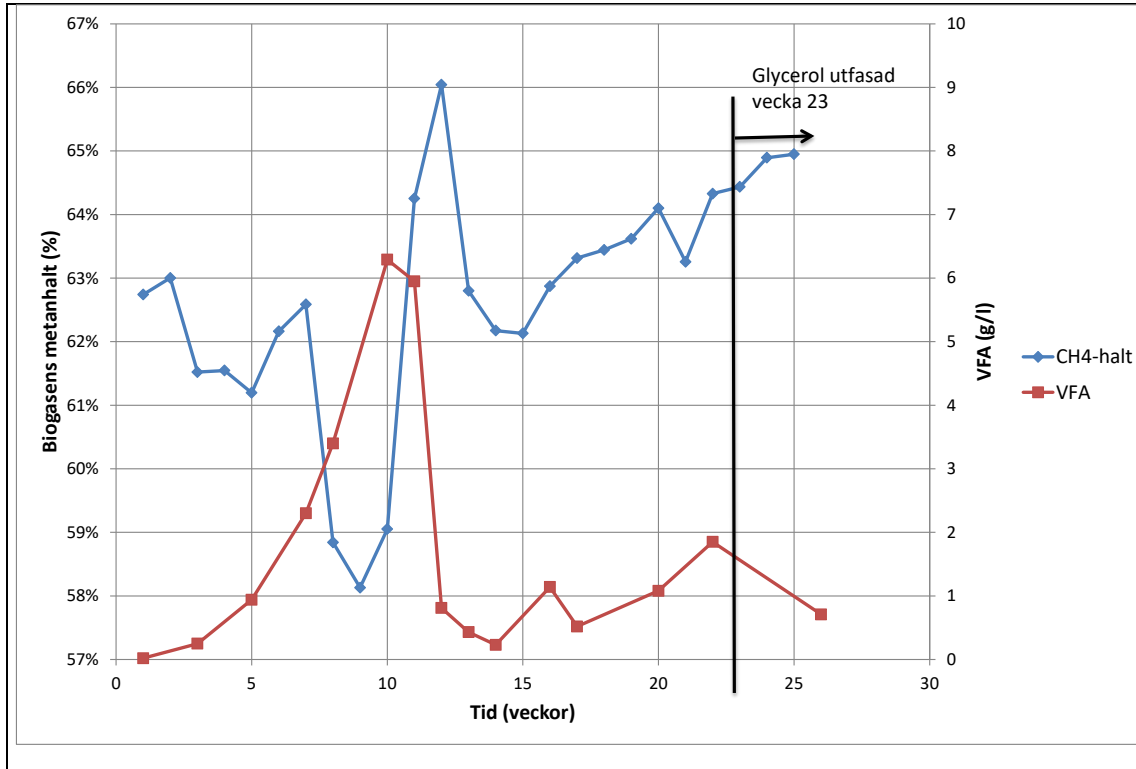




Figur B1:1. Veckomedel, vätviktsfördelning på ingående till röttkammaren fördelat på fastgödsel, slurry och spädvatten.



Figur B1:2. Veckomedel för specifik metanproduktion, volymetrisk biogasproduktion och organisk belastning (OLR).



Figur B1:3. Veckomedel för biogasens metanhalt samt förekomst av flyktiga fettsyror i rötkammaren.

## Bilaga 2: AP2

### Centrifugering

Valet av centrifugen som fassseparator berodde dels på att den effektivt kan separera bort partiklar (med storlek större än kolloider) som kan försämra indunstningens funktion, dels på att vi ville se hur mycket fosfor från vår rötrest som kunde styras över till fastfasen. Fosfor är knuten till partiklarna (suspenderat material) medan ammoniumkvävet är löst som ammoniak eller som ammoniumsalter och därmed följer vätskefasen.

Vi var inte beredda på skumningen och hade sålunda inte förberett oss med skumdämpare eller reservvolym. Försöket genomfördes utomhus under vintern med temperaturer kring 0°C. Noxon konstaterade också lakoniskt att skumning hade de haft på alla andra försök med gödsel och rötrest. Nu vet vi.

Omställningen av centrifugens utloppsnivåskivor innebär stopp med utrullning, inställning och uppstart med fyllning av trumman innan den kontinuerliga produktionen kommer igång. Därför måste olika körprogram planeras noga och inberäkna materialförluster i samband med tömning och uppstart. Produktionsbortfall ca 1 tim per omställning. Det gjordes två omställningar och för tunnfas för indunstning ställdes nivåskivorna i högsta läget, som ger bäst renhet i tunnfasen ("rejktet").

De kontroller av TS i fastfas och tunnfas som kunde göras på plats gjordes med Noxons snabb-TS-våg, som ändå fordrade ca 1 tim på varje prov.

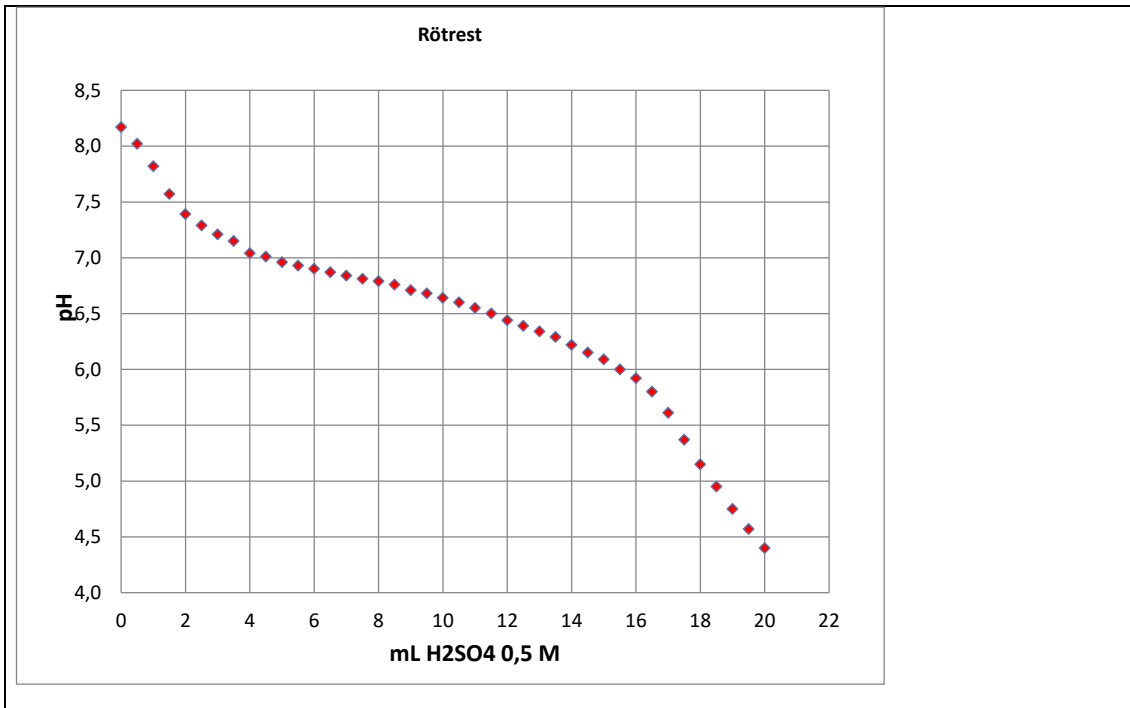
För indunstningen är det av betydelse hur mycket SS (suspendid solids) som finns i matningen och våra enkla burkprov och observationer i pumptanken visade att centrifugen gjorde bra ifrån sig och vi hittade inga bottensatser eller partiklar

Halten suspenderat material kan också bestå av partiklar (eller kolloider), som har lägre densitet än vätskan och då kan de inte avskiljas med en centrifug. Följaktligen finns suspenderat material i de 3,2 % TS som fanns i tunnfasen. TS består också av salter.

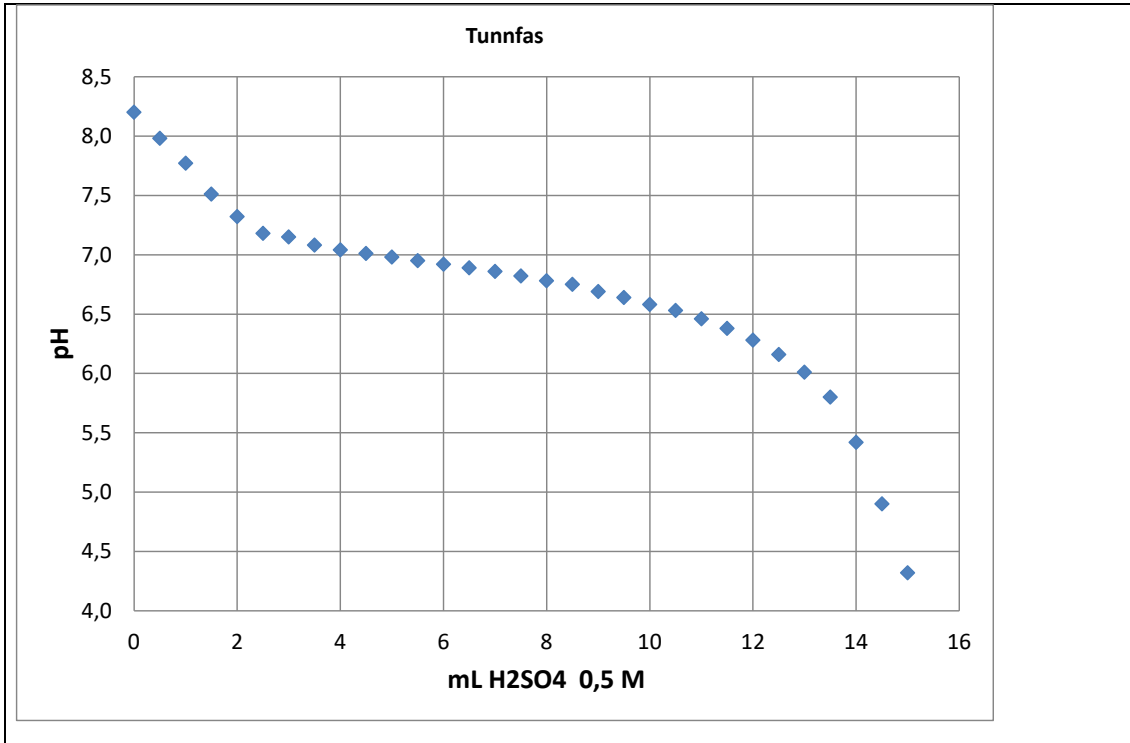
Resultatet av provtagningarna visar att vi kan räkna med 3,2-3,5 % TS i tunnfasen om vi inte betonar hög TS på fastfasen. Avvattningsförsöken i Danmark med GEA-centrifug har resulterat i att det uppnåtts en TS-halt på 2,7 % TS för tunnfasen (Sven Persson, pers. medd.).

Ammoniumkvävet i tunnfasen blev 4,1 kg/t mot 3,4 kg/t i fastfasen. När det gäller fördelningen av rötrestens ammoniumkväve blir resultatet tydligare. Baserat på TS-halterna blir fördelningen mellan tunnfas och fastfas 80:20. Rötrestens analys av ammoniumkväve under pilotkörningen visade på ca 5,8 kg NH<sub>4</sub>-N/t och minskningen härrör från den långa lagringen i IBC-behållare. Vi konstaterade också att locken inte varit påskruvade helt, eftersom efterrötning pågick när de magasinerades och vi ville inte spräcka några behållare. Fördelningen av den lagrade rötrestens ammoniumkväve blev efter centrifugen sådan att 17 % blev kvar i fastfasen och 83 % återfanns i tunnfasen.

Fosforhalterna är dramatiskt mycket lägre i tunnfasen och därför kan givan vid gödsling med tunnfas ökas mycket innan fosforgränsvärdet 22 kg/ha uppnås, samtidigt som kvävegivan kan hållas hög. Fördelningen av rötrestens fosfor blir 79 % till fastfasen och 21 % till tunnfasen, baserat på TS-fördelningen.

**Titriering av biogödsel och tunnfas**

Figur B2:1. Åtgång av 0,5 M svavelsyra (i mL) vid titrering av 40,49 g rötrest.



Figur B2:2. Åtgång av 0,5 M svavelsyra (i mL) vid titrering av 40,44 g vätskefas genererad efter centrifugering av rötrest.

## **Surgörning**

Vid surgörningen fylldes blandningsbehållaren till ca 60 % med utrymme för skumbildning. Första doseringen kunde bli ca 2 kg svavelsyra innan skumningen fyllde behållaren. Därefter klarade skumningen inte mer än ca 1 kg svavelsyra per omgång. Det visade sig att skumdämparen fungerade bäst när den tillsattes på skumfri vätskeyta och därefter svavelsyradosering. Spray direkt på skummet var en nödlösning som kostade mer skumdämpare än nödvändigt.

Vid tillförseln av svavelsyra sågs skummet växa stegvis i takt med membranpumpens slag. Fysikaliskt var det CO<sub>2</sub> som drevs ut ur kalkstenspartiklarna i tunnfasen. I lämpligt ljus kunde man se genom ett tunt gasskikt mot vit bakgrund att den gas som bildades och "rann" över kanten var tyngre än luft och hade ett annat brytningsindex. Skiktet dallrade som vid olika varma luftskikt en solig dag. Gasen var CO<sub>2</sub>.

Efter avslutad surgörningssats noterades skumdämpartyp och åtgång. Vi konstaterade att sättet att tillsätta skumdämparen gjorde mer för behovet än de olika typerna av skumdämpare.

Vi konstaterade också att volymen hos den surgjorda vätskan var ca 20 % större än när vi började surgörningen. Troligen var det mikrobåsar av gas som inte upplöstes förrän efter en tid. Svavelsyratillsatsen var ca 12 kg (7 l) på 500 l sats medan volymökningen motsvarade ca 90 l.

## **Indunstning**

Indunstaren var en specialbyggd 20-fots container med sk MVR-teknik. Fallfilmsdelen var ett torn som kunde fällas upp genom en lucka i taket. Därefter fälldes luckan ner igen och det kvarvarande hålet tätades med en formsydd presenningsmanschett. Elanslutningen krävde 125 kW matning och det gjordes en specialinkoppling på anläggningen.

MVR-tekniken innebär att kompressorn i princip inte ger något värmetillskott till ingående medium annat än strömningsförlusterna, som ger lite värme. En liten elpanna användes för att värma mediet till starttemperatur. Värmeförlusterna genom de oisolerade kärnen och rören gjorde att indunstningen ägde rum vid så låg temperatur som 60 °C.

### Tekniska erfarenheter:

Tätningvatten och matning tillfördes via en vägghpanel med anslutningar. Tätningvattenavlopp och avdragsgas fördes ut genom en slang i ena gaveln. Kondensat och koncentrat fördes ut genom anslutningspanelen och tillbaka inomhus till mottagningsbehållare typ IBC.

Det var minusgrader ute under försöket och tätningvattenslangen måste ha frysskydd medan produktledningarna höll sig öppna av att produkterna var ca 65 °C när de lämnade indunstaren.

Vi hade tre behållare före indunstaren. Sugledningen från dem delades upp i tre ovan behållarna. De tre benen leddes ner till botten med styva PE-rör, som var snedskurna för att inte fastna mot botten. På detta sätt var alla tre behållarna kopplade med hävert sinsemellan och nivån sjönk lika i alla behållarna. Körtiden blev då teoretiskt över 10 tim.

Elåtgång:

Försöket gjorde ingen utvärdering av den specifika elförbrukningen vid MVR-indunstning. Det finns tillräckligt med erfarenhet genom anläggningar som är i drift och de pekar på att 20 kWh/ t avdrivet vatten är möjligt att uppnå.

## Bilaga 3: AP4

### Förrådsgödsling

Allmänna rekommendationer för gödsling är att gödsla efter grödans växtnäringsbehov (Jordbruksverket, 2017). Ta till exempel höstvetete som odlas på en konventionell gård i Södra Götaland med en förväntad skörd på 8 t/ha. Allmänna råd för gödsling av N, P, K och S är 180, 15, 10 och 15 kg/ha respektive. Eftersom grödans N/P-behov ligger på 12 och N/P-förhållandet i biogödseln är 6, betyder det att fosfor kommer att vara den begränsande faktorn för att beräkna doseringen. Utgående från fosforbehov blir givan av biogödsel 11 t/ha. Det täcker bara 25 % av kvävebehovet. Om man sprider rötresten på samma fält varje år får man sprida max 22 kg P/ha per år. Givan för biogödsel blir då 16 t/ha, som ökar kvävedoseringen till 37 % av grödans (höstveteteexempel) behov samtidigt som 6 kg P/ha aldrig kommer att nyttjas. I de fall spridning inte sker på samma fält varje år finns möjligheten att öka spridningsgivan och förrådsgödsla med fosfor till följande års gröda, och därmed ökar också andelen kväve som tillsätts. Generella rekommendationer är att undvika förrådsgödsling med fosfor, men viss förrådsgödsling kan vara acceptabel när det är försvarbart av ekonomiska skäl (Jordbruksverket, 2017). Ligger fältet innanför nitratkänsliga område är spridning av organiska gödselmedel begränsad till max 180 kg N/ha per år inklusive organiskt kväve, och det kan bli den begränsande faktorn för bestämning av spridningsgivan. Möjligheten till förrådsgödsling är mer relevant för biogödsel och fastfasen eftersom spridningsgivan för dem är begränsad av fosforhalten, och det kan öka gödslingsvärdet eftersom man får tillgång till mer kväve. Förrådsgödsling innebär en risk eftersom fosfor kan förloras via läckage eller avrinning.

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

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



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

Jordbruk och livsmedel  
RISE Rapport : 2018:39  
ISBN: 978-91-88695-78-9