



Teknisk-ekonomisk utvärdering av innovativa rötrestförädlingstekniker

Johan Saarela
Ab Stormossen Oy
12.05.2022

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

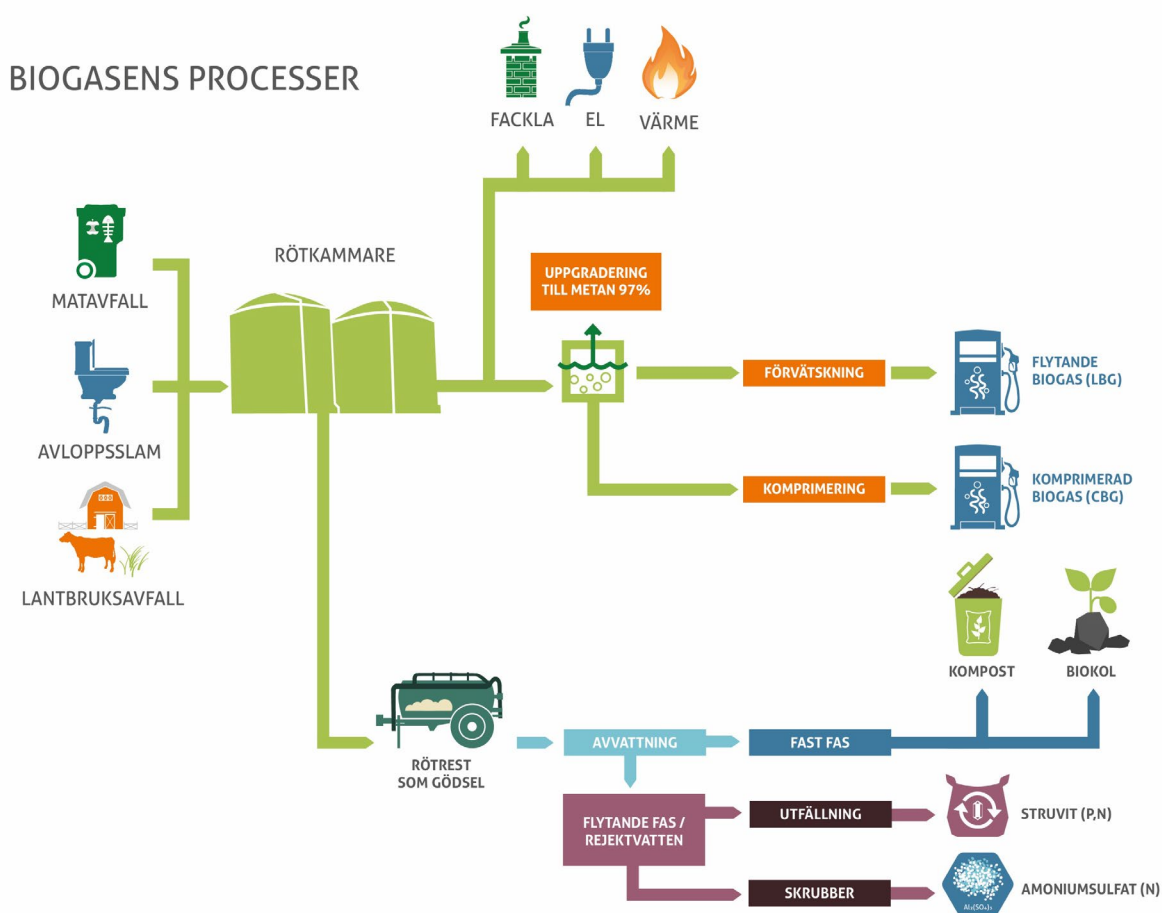
SAMMANFATTNING	3
INLEDNING	4
Syfte	5
Metodik	5
FÖRÄDLINGSTEKNIKER.....	6
Rötrest som gödsel	6
Kompostering	6
Ammoniumstripping/scrubbing	6
Pyrolys	8
CASE: STORMOSSEN	10
Investeringskalkyl	11
Koldioxidreducering.....	13
Ammonium-stripping.....	14
Ökad utrötning.....	16
Pyrolys	17
DISKUSSION.....	19
SLUTSATS	21
REFERENSLISTA	22

SAMMANFATTNING

Rötresthanteringen är vid flera biogasanläggningar något som lämnat i skymundan i mån för själva biogasen som lättare kunnat omvandlas till en intäkt. Det finns en stor potential att ytterligare kunna bidra till den cirkulära ekonomin genom att återvinna näringsämnen och kol för att återföra dem till kretsloppet som en förädlad rötrestprodukt. Syftet med den teknisk-ekonomiska utvärderingen var att redogöra för möjligheten att återvinna näringsämnen ur rötrest. Analysresultat och driftsdata för Stormossens biogasanläggning användes vid verifiering av förädlingsteknikernas funktionalitet och påverkan på rötresten samt dess hanteringskostnad. Diskussioner, workshops och studiebesök genomfördes tillsammans med andra biogasproducenter och teknikleverantörer. Av de kommersiella tekniker som undersöktes noggrannare är både ammonium-stripping och pyrolys tekniskt genomförbart. Det största hindret med ammonium-stripping är dess energi- och kemikalieförbrukning medan en pyrolysanläggning består av många olika processteg vilket leder till både hög investerings- och driftskostnad. Både ammonium-stripping och pyrolys ger rena slutprodukter ett kvävegödselmedel och ett fosforgödselmedel. Ammonium-sulfatet med svavel som den främst begränsande faktorn och slambiokelet med den hårt bundna fosfor som begränsande faktorn om slutprodukterna avses att användas inom jordbruket. Den mest kostnadseffektiva lösningen är att minska rötrestmängden genom ökad utrötningsgrad för att erhålla biogas där marknad och stödmekanismer finns på plats jämfört med för återvinning av näringsämnen. Ingen av de undersökta teknikerna bär sig rent ekonomiskt i dagsläget när de jämförts med utvidgad röt-kammarvolym utifrån återbetalningstid och avkastning på investerat kapital (ROI). Det största hindret med miljövänliga och hållbart producerade regionala produkter oavsett om det är biogas eller återvunna näringsämnen är den ekonomiska aspekten. Därför vore det av stor vikt att frångå det traditionella synsättet på lösningars ekonomiska innebörd och i stället se på deras värden för den regionala ekonomin och miljön ur ett hållbarhetsperspektiv där hela kedjan beaktas.

INLEDNING

Rötresthanteringen är vid flera biogasanläggningar något som lämnat i skymundan i mån för själva biogasen som lättare kunnat omvandlas till en intäkt. Biogasanläggningar har dock en stor potential att ytterligare kunna bidra till den cirkulära ekonomin genom att återvinna näringsämnen och kol för att återföra dem till kretsloppet som en förädlad rötrestprodukt. I början av Botnia Näring i Kretslopp projektet togs en nulägesanalys fram där biogasproducenter i regionen intervjuades, rötrest mängder kartlades, bakgrundsinformation kring mikroplaster och läkemedel sammanställdes och en första urgallring av potentiella förädlingstekniker gjordes. Valet av tekniker baserade sig framför allt på två aspekter; kolet i rötresten skulle återföras till marken, inte förbrännas till koldioxid och tekniken samt slutprodukten skulle vara påvisade kommersiella. Två tekniker valdes för att utredas mera ingående ammoniumstripping/scrubbing och pyrolys. Även struvit-utfällning och dess potential undersöktes med laborationsförsök, se Figur 1.



Figur 1. Biogasprocessens huvuddrag för biogas- och rötresthantering.

Röttningsprocessen gör att koncentrationen av både kväve och fosfor ökar. Det gör det möjligt att återvinna kvävet genom ammonium-stripping/scrubbing i stället för att rena kvävet genom denitrifikation och nitrifikation för avgång till atmosfären. Detta är en etablerad scrubberteknik med en kommersiell slutprodukt för antingen jordbruket eller industriella ändamål. Vid alla biogasanläggningar och speciellt vid de med våt rötning uppstår problem med rejektivatten som kan leda till höga avloppsvattenkostnader. Evaporations tekniken var ett potentiellt spår som reddes ut i samband med möjligheterna för ammoniumstripping/scrubbing. Förutom ammoniumsulfat fås relativt rent vatten och en koncentrerad rötrest genom evaporation.

Samma rundgång som för övriga ämnen återfinns också med fosfor. Den hamnar med slammet och avfallet för att koncentreras vid biogasanläggningar. Därmed är det ett bra ställe att återvinna fosfor antingen som struvit eller som en slam-biokolsprodukt. Struviten är näringstät och kan exporteras till områden med mycket växtodling. Problemet är om fosfor låsts till metallkomplex vid utfällning vid avloppsreningsverk så är den svår att fäll ut. Därför undersöktes möjliga sätt att påverka utfällningsförhållandena och möjliggöra en högre struvit-utfällning.

Fosfor kan också återvinnas genom pyrolys av den avvattnade rötresten varpå den lämnar kvar tillsammans med en del kol som ett så kallat slam-biokol. Detta ger en mer homogen och renare produkt än vid enbart kompostering av den avvattnade rötresten. Utöver att slutprodukten blir mer lätthanterlig så förkolnas mikropaster och läkemedel bryts ner. Däremot så avgår mycket av kvävet varför den kräver tillsats av kvävegödsel om den ska användas för jordbruksändamål. Dessutom finns risk för ackumulering av vissa tungmetaller eftersom själva massan minskar och koncentration ökar, dessa är dock hårt bundna till kolet liksom fosfor också är. Pyrolys är en beprövad teknik men inte för rötrest. Främsta problemet är den höga energiförbrukningen som dels uppstår vid förtorkningen av rötresten som gärna ska ha en torrsubstans på närmare 90 % innan själva pyrolyseringen sker. För att få bättre energibalans kan olika stödmaterial läggas till t.ex. träflis, vilket även höjer kolhalten i slutprodukten.

Kompostering av rötresten eller rötresten som sådan kommer att utgöra ett slags nollalternativ vid jämförelse av olika processupplägg.

Syfte

Syftet med den teknisk-ekonomiska utvärderingen var att redogöra för olika förädlingsteknikers påverkan på hanteringskostnaden för rötrest samt möjligheten att återvinna näringsämnen ur rötresten. Utredningen påvisar även vilka faktorer som möjliggör en investering. Syftet var även att belysa eventuella problem med valda förädlingstekniker. Det huvudsakliga målet var att ta fram underlagsmaterial för hur de olika förädlingsteknikerna klarar sig ekonomiskt så som återbetalningstid, inbesparningar och behov av ekonomiskt stöd.

Metodik

Stormossen utgjorde själva caset i redogörelsen vilket motsvarar en mellanstor biogasanläggning i regionen. Analysresultat och driftsdata för Stormossens biogasanläggning användes som utgångsdata vid diskussion med teknikleverantörer och andra biogasaktörer i Finland och Sverige. Projektet samverkade och deltog i andra projekts evenemang och workshops, både inom programområdet och på andra håll i Europa. Inom projektet ordnades även roundtable presentationer med teknikleverantörer för olika förädlingstekniker. Även pilot- och labbtest gjordes för verifiering av huruvida tekniken kan hanteras substratströmmarna vid Stormossen.

FÖRÄDLINGSTEKNIKER

De förädlingstekniker som har analyserats djupare är de som utifrån nulägesanalyser ansågs vara längst utvecklade och finns som kommersialiserade lösningar på marknaden.

Rötrest som gödsel

Hela rötresten tas tillvara och det kommer från hushållsavfall och lantbruksgödsel. Används idag som gödselmedel men i vissa fall är transportkostnaden dyr pga. långa avstånd till åkermark från biogasanläggningen. Rötrestens gödselvärde varierar med substratet och växttillgängligheten är ofta bättre än orötad gödsel och ibland till och med likvärdig med mineralgödsel. Luktproblemen minskar också då gödsel har rötats jämfört med icke rötad gödsel. På basis av nulägesanalysen och marknadsutredningen kan ett prisintervall för bioavfalls- och jordbruksbaserad rötrest rör sig kring 0 – 1 €/m³, dock hamnar biogasproducenten oftast att bekosta transportkostnaden som ligger på 3 – 6 €/m³ flytande rötrest beroende på placeringsalternativ och transportsträcka.

Kompostering

Den avvattnade rötresten blandas med stödmaterial t.ex. flis och komposteras för att senare siktas och blandas med sand, kalk eller andra material för att få önskad slutprodukt t.ex. jordförbättringskompost för odling eller anläggningsjord. För att komposteringsprocessen ska fungera bra behövs syre, näringsämnen, lämplig fuktighet och värme. Växttillgängligheten hos olika produkter från rötrest är högst hos flytande rötrest och ammoniumsulfat samt lägst hos kompost se Tabell 1.¹ Både kompost för odlingsändamål och som anläggningsjord säljs för mellan 0 – 20 €/ton enligt nulägesanalysen medan tillverkningskostnaden generellt ligger mellan 40 och 60 €/ton avattnad rötrest.

Tabell 1. Kvävetillgänglighet jämfört med mineralgödsel för olika produkter från rötrest.

Produkt	Kvävetillgänglighet
Flytande rötrest	50-100 %
Torkad rötrest	30-70 %
Kompost	21 %
Ammoniumsulfat från stripping	100 %

Ammoniumstripping/scrubbing

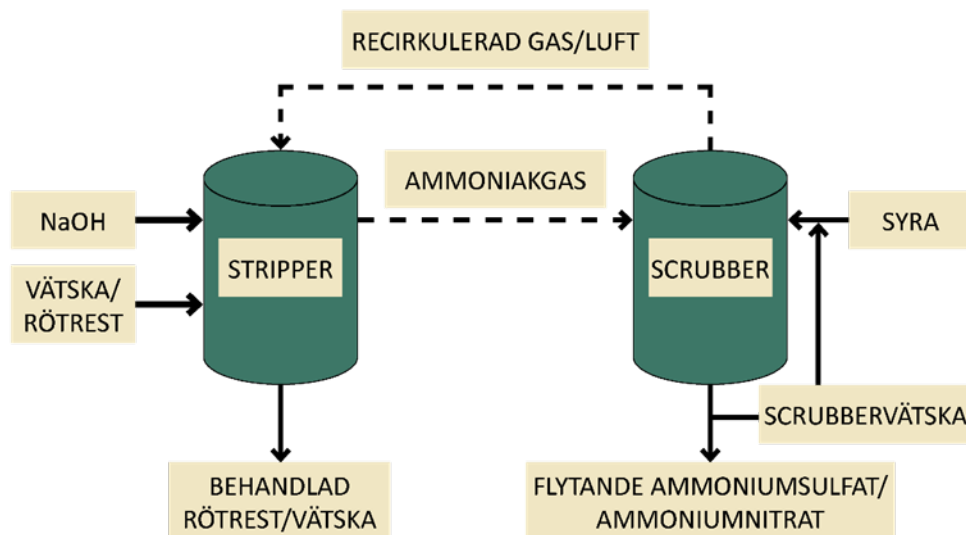
Ammonium-stripping används speciellt på flöden med höga ammoniumnivåer på över 1kg/m³. Därmed är denna teknik intressant vid biogasanläggningar som hanterar slam från avloppsvattenreningsverk eftersom nivåerna har koncentrerats avsevärt jämfört med i avloppsvattnet där nivån ligger kring 50 mg/liter.² Ammonium-stripping med luft fungerar enligt samma princip som en vattenskrubber, där finns en stripperkolonn och en scrubberkolonn.

Till stripperkolonnen tillförs rötresten eller rejektvatten samt luft för att leda bort ammoniak i gasform till scrubberkolonnen. Även biogas har testats som avdrivningsmedium. För att driva av ammoniaken tilläggas även lut (NaOH) eller bränd kalk för att göra lösningen alkalisk, helt enkelt för att skjuta balansen mot ammoniak. I scrubberkolonnen används vanligen svavelsyra (H₂SO₄) eller salpetersyra (HNO₃) som scrubberlösning för att övergå från ammoniak till ammoniumsulfat eller ammoniumnitratlösning som är

¹ Sanchez-Monedero, M. A., M. L. Cayuela, A. Roig, K. Jindo, C. Mondini and N. Bolan (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology* 247: 1155-1164.

² International Water Association (2019) Rethinking our nitrogen needs in the circular economy. Hämtad från: <https://www.thesourcemagazine.org/rethinking-our-nitrogen-needs-in-the-circular-economy/>

slutprodukten. Främsta orsaken till att svavelsyra används är att den är billigare, samt inte har samma explosiva karaktär. Ungefär 3 kg svavelsyra (H_2SO_4) behövs för varje kg ammonium i rektvattnet som matas in till anläggningen. Ammoniumsulfat är lösligt i vatten och därmed lätt för växterna att ta upp. Se Figur 2 för en förenklad processbild av ammonium-stripping tekniken.



Figur 2. En förenklad processbild på hur en ammonium-stripping/scrubbing enhet kan se ut.

I en ammonium-scrubber med ånga istället för luft som drivande medium är principerna ganska lika. Främsta skillnaden är att ammoniaken drivs bort med het ånga istället, vilket ger en ammoniumvattenlösning som slutprodukt. Värmen i ångan hjälper också till att flytta balansen mot ammoniak. Återvinningsgraden för ammonium-stripping ligger på mellan 70 och 99 % vid pH 10 och 70°C och en slutprodukt som innehåller en koncentration av N på över 15 %.³ Vid processupplägg där det är rötresten som strippas kan den även föras tillbaka till rötningsreaktorn och på så vis reducera risken för ammoniakinhibering i rötningen. Energiåtgången vid ammonium-stripping ligger mellan 50 och 100 kWh/kg NH_4 varav största delen är värmeenergi.⁴

Slutprodukt från ammonium-stripping/scrubbing listas av EU som en högt prioriterad gödselprodukt med potential att ersätta syntetisk kvävegödsel.⁵ Dess pH-nivå varierar mellan pH 2 och pH 7 beroende på processutformning. Växttillgängligheten hos ammoniumsulfat från stripping motsvarar kommersiell syntetiskt ammoniumsulfat.⁶ Slutprodukten kan även erhållas som en ammoniumlösning efter förångning och kondensation av vatten och flyktiga komponenter. Den är då fri från partiklar, metaller och patogener. Därmed innehåller den inte heller fosfor, kalium och andra mineraler. Vätskan är basisk och gödselvärdet motsvarar syntetiskt tillverkad ammonium.⁷ Pris och kvalitet på ammoniumsulfat varierar och flytande ammoniumsulfat säljs i Finland för 120 €/m³ med en koncentration på 35% och totalkväve på cirka 9% och svavel cirka 10%. Priset för kristalliserat ammoniumsulfat är högre cirka 140 €/ton. Större kristaller ger ett

³ Sigurnjak et al. (2019) Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-) scrubbing technology. Waste Management, Volume 89, s. 265-274.

⁴ Fachverband Biogas (2018) Digestate as fertilizer. https://caninternational.no/onewebmedia/Digestate_as_Fertilizer.pdf Hämtat: 14.04.2022

⁵ Sigurnjak et al. (2019) Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-) scrubbing technology. Waste Management, Volume 89, s. 265-274.

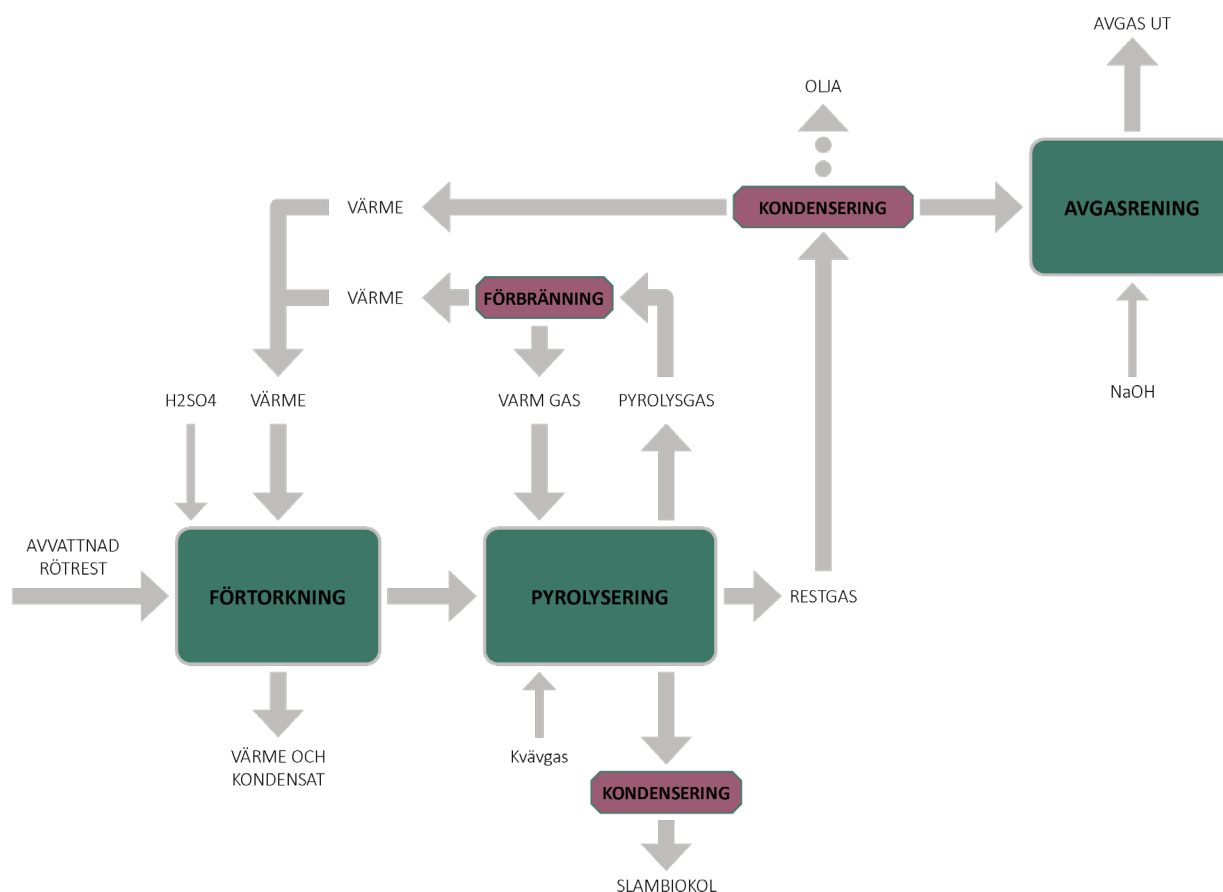
⁶ Szymanska, M., T. Sosulski, E. Szara, A. Was, P. Sulewski, G. W. P. van Pruissen and R. L. Cornelissen (2019). "Ammonium Sulphate from a Bio-Refinery System as a Fertilizer-Agronomic and Economic Effectiveness on the Farm Scale." *Energies* **12**(24).

⁷ Systemic project (2019) Condensated ammonium water. Hämtad från: <https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/Factsheet-ammonium-water.pdf>

högre pris och kväve samt svavelinnehållet ligger på cirka ca 21% och 24%. Den svenska leverantören Biototal säljer ammoniumsulfat för 0,60 €/kg, vilket motsvarar 140 €/ton med ett kväveinnehåll på 23 %.

Pyrolys

Pyrolys innebär att ett material upphettas till en hög temperatur oftast mellan 400 °C och 1000 °C. Det sker i en syrefri miljö, vilket gör att materialet, i detta fall den fasta delen av rötresten, sönderfaller utan att förbränning sker. Vid pyrolys avgår flyktiga ämnen i gasform vilka kan förbrännas för att tillverka värme åt processen. En fast återstod blir kvar som kallas biokol, se Figur 3 för en principskiss av pyrolyprocessen.



Figur 3. Principskiss av pyrolyprocessen

Tillsats av svavelsyra (H₂SO₄) vid förtorkningen av rötresten görs för att neutralisera ammoniakgasen som uppstår. Likaså används natriumhydroxid (NaOH) som skrubbeväska vid avgasreningen för att fånga klor (Cl) som mer eller mindre alltid förekommer i slamrötresten. Ytterligare används aktivt kol som filtermaterial för rening av tungmetaller som övergått till gasfasen t.ex. arsenik (As), kvicksilver (Hg), bly (Pb) och kadmium (Cd). Vid högre halter föroreningar stiger också kemikalieåtgången. En pyrolysanläggning räknas som förbränningsanläggning och kräver därmed avgasrening.

Certifierat biokol enligt European Certified Biochar innehåller minst 50 % kol.⁸ Råvaran kan bestå av olika organiska material som sågspån eller andra restprodukter från skogen samt slam från rötrest. Den senare innehåller dock i allmänhet mindre än 50 % kol. Januari 2022 uppdaterade EBC sin metodologi varpå även slam infördes som ett godkänt substrat.⁹ Ett kriterium som nämnts är t.ex. att H/C-kvoten ska vara under

⁸ European Biochar Foundation (EBC) (2012) European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Arbaz.

⁹ European Biochar Organisation (2022) Guidelines for a sustainable production of biochar. https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf Hämtat: 01.04.2022

0,7. Övriga egenskaper och energibalanser med mera måste verifieras externt innan godkännande. Kriterierna för slam och dess användningsändamål är under uppdatering och en vetenskaplig rapport är vänta. Egenskaperna hos det pyrolyserade kolet påverkas av inmatat substrat, driftsförhållanden och efterföljande bearbetning.

Pyrolys av rötrest kräver att slammet först torkas. Processen blir därmed energikrävande men TRL är högt (6–9). Biokol återvinner 95 % av fosfor, men det krävs höga temperaturer för att rena kolet från organiska föroreningar, kadmium, kvicksilver och arsenik. Den högre temperaturen leder även till att mindre pyrolysolja uppstår, men samtidigt sänks också kolhalten i materialet eftersom förbränningen ökar. Slambioolet blir en stabil produkt, en kolsänka, som kan återföras till marken som jordförbättrare. Beroende på koletsstruktur och sammansättning finns även många andra applikationsområden som det forskas kring t.ex. aktivtkol för luft och vattenrening, kol-skum och även för batterindustrin. I dagsläget finns inga kvalitetskriterier för biokol av rötrest som gödselprodukt.¹⁰

Generellt så är kvävehalterna låga i aska och biokol, medan fosfor och kalium å andra sidan koncentreras. Används biokolen som tillsatsämne i kompostering kan de effektivisera processen och minska kväveförlusterna. Beroende på råvarans sammansättning, pyrolystemperatur och -hastighet eller blandning med andra råvaror får biokolet olika egenskaper.¹¹ Biokolen är att betrakta som framför allt ett markförbättringsmedel, men slambiookol är också ett fosforgödselmedel. För att få bra skördar behöver den kompletteras med något kvävegödselmedel. Biokol kan också ersätta fossilt kol inom tex gruv- och stålindustrin. Priset för slamkol har vid diskussioner med teknikleverantörer och andra i branschen inom EU uppskattats till 0 – 150 €/ton, vilket främst baserar sig på fosforinnehållet och dess värde. Däremot om slammet pyrolyserats tillsammans med träråvaror och uppnår ett högre kolinnehåll samt bättre struktur på slutprodukten kunde ett högre pris väntas, troligen kring 300 €/ton. Om slambioolet kan säljas som CO₂-sänka via certifiering kan det ytterligare inbringa 80 €/ton CO₂-ekvivalent enligt marknadspriset 28.03.2022.¹²

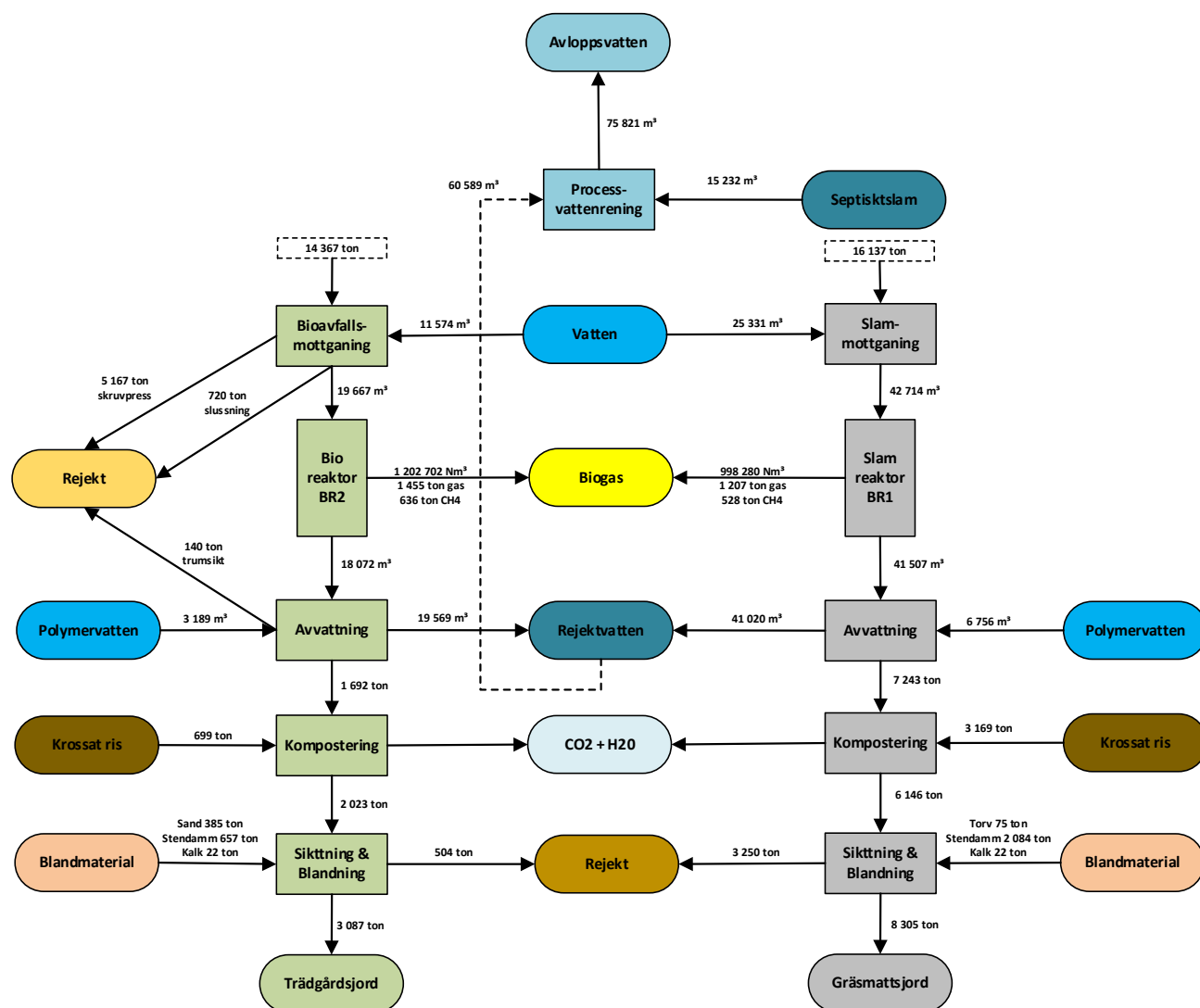
¹⁰ Holmgren, G. (2020). Hållbar slamhantering - Betänkande av Utredningen om en giftfri och cirkulär återföring av fosfor från avloppsslam Statens Offentliga Utredningar. Stockholm, Regeringskansliet. SOU 2020:3.

¹¹ Seppänen et al. (2020) Gödsling med återvunnen gödsel – Planering, praxis och möjligheter i framtiden. Helsingfors: Luke.

¹² Sandbag (2022) Smarter climate policy – CO₂ emission allowance. <https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/> Hämtat: 28.03.2022

CASE: STORMOSSEN

Stormossens biogasprocess med fokus på rötresthanteringen kan ses i Figur 4. Avgång till luft som koldioxid och vattenånga under komposteringen kan inte utifrån tillgängliga driftsdata fastställas med säkerhet eftersom förflyttning och lagring av komposten varierar över året.



Figur 4. Blockschema för Stormossens biogasprocess med mängder för år 2020.

Utifrån ovanstående driftsdata har en teknisk-ekonomisk utvärdering gjorts för pyrolys och ammonium-stripping. För pyrolys har mängden avvattnad rötrest 8 935 ton använts plus tillagt krossat ris 3 869 ton. För ammonium-stripping har den totala mängden rejektvatten använts 60 589 m³ och vid värdering av avloppsvattenkostanden har totala utgående mängden 75 821 m³ beaktats vid analys av processförändringar. Vid labbtest och beräkning av driftsdata för de två investeringsobjekten har analysresultat för slamreaktorn respektive bioavfallsreaktorn använts för att upptäcka eventuella tekniska hinder. Eftersom Stormossens biogasanläggning designades och byggdes för över 30 år sedan så har både slam- och avfallsmängder ändrats men också behandlingstekniker. Därför har parallella undersökningars resultat satts med som jämförelsealternativ i detta fall främst en utvidgning av röt-kammarvolymen för slamhantering eftersom den nuvarande process är planerad för knappt halva slammängden.

Investeringskalkyl

Kostnaderna för de olika investeringsalternativen är baserade på anbud och diskussioner med teknikleverantörer och andra biogasproducenter. CAPEX och OPEX är kalkylerade som förstudiesiffror det vill säga ungefär +/- 25 % per scenario. Nästa steg vore att göra en ingenjör- och design baserad kostnadsbedömning för att uppnå +/- 10 % och sen avtalsbaserad för att komma inom intervallet +/- 5 %. Kalkylerna är uppbyggda utifrån tre scenarier med kända investeringskostnader före Ukraina kriget bröt ut februari 2022:

1. Utan investeringsstöd och med kända prisnivåer för slutprodukterna
2. 30 % investeringsstöd och kända prisnivåer för slutprodukterna
3. 30 % investeringsstöd och ökad intäkt från slutprodukterna

De olika scenarierna jämför kapitalkostnad (CAPEX), driftskostnad (OPEX) och intäkt från slutprodukterna samt ROI, return on investment. I det första och mest konservativa scenariot Tabell 2 används kända priser för slutprodukterna innan prisstegringen på naturgas hösten 2021 och Ukraina kriget bröt ut vintern 2022. Det som bör beaktas är att pyrolysens slutprodukter både slambioolet och CO₂-sänkan är värderade till 0 €. Att anmärka är också att alla investeringskostnaderna stigit till följd av de höga metallpriserna våren 2022.

Tabell 2. Scenario 1 - jämförelse av olika investeringsalternativ med kända produktpriser och utan stöd.

SCENARIO 1 - KONSERVATIVT	Kompostering	Pyrolys	Amonium-stripping	3:e reaktor
Investering	562 500	5 056 250	851 250	3 187 500 €
Stöd	0	0	0	0 %
Avskrivningstid	15	15	15	15 år
Ränta	3	3	3	3 %
Driftskostnad	487 715	431 001	279 204	124 135 €/år
Intäkt	186 176	340 989	80 411	394 775 €/år
Återbetalningstid	6	16	14	8 år
ROI	-54	-2	-23	9 %
Produkter / Inbesparning	Jord	Slam-biokol	Ammonium-sulfat	Biogas
		CO ₂ -certifikat	VA-taxa	CO ₂ -certifikat
				Mindre humus
				VA-taxa

I scenario två har en stödprocent på 30% satts in för alla alternativen och ett värde på CO₂-sänkan från pyrolys enligt marknadspriset 80 €/ton CO₂.ekv, se Tabell 3. Ett 30 procentsstöd för en biogasreaktor är inte möjligt i Finland i dagsläget utan gränsen går vid 20%.

Tabell 3. Scenario 2 - med 30% stöd samt intäkt från försäljning av kolkrediter.

SCENARIO 2 - MED STÖD	Kompostering	Pyrolys	Amonium-stripping	3:e reaktor
Investering	562 500	5 056 250	851 250	3 187 500 €
Stöd	30	30	30	30 %
Avskrivningstid	15	15	15	15 år
Ränta	3	3	3	3 %
Driftskostnad	487 715	431 001	279 204	124 135 €/år
Intäkt	186 176	455 443	80 411	394 775 €/år
Återbetalningstid	5	9	11	6 år
ROI	-77	1	-33	12 %
Produkter / Inbesparning	Jord	Slam-biokol	Ammonium-sulfat	Biogas
		CO ₂ -certifikat	VA-taxa	CO ₂ -certifikat
				Mindre humus
				VA-taxa

I det tredje och mest optimistiska scenariot, Tabell 4, har slutprodukterna värden ökat med 50% för biogasen och dess CO2-certifikat (distributionsskylighet) samt också 50%. För pyrolysen har också dess CO2-sänka värderats 50% högre samt att dess slutprodukt har värderats till 150 €/ton, ungefär dess fosforvärde. Ammoniumsulfatet har värderats dubbelt högre än det kända priset sommaren 2021, det vill säga till 280 €/ton.

Tabell 4. Scenario 3 - det mest optimistiska med 30%, intäkt från kolkrediter och höjda priser för slutprodukterna så som slambiokol 150 €/ton och ammoniumsulfat till det dubbla 280 €/ton.

SCENARIO 3 - OPTIMISTISKT	Kompostering	Pyrolys	Amonium-stripping	3:e reaktor
Investering	562 500	5 056 250	851 250	3 187 500 €
Stöd	30	30	30	30 %
Avskrivningstid	15	15	15	15 år
Ränta	3	3	3	3 %
Driftskostnad	487 715	431 001	279 204	124 135 €/år
Intäkt	186 176	803 992	121 918	524 626 €/år
Återbetalningstid	5	5	7	5 år
ROI	-77	11	-26	18 %
Produkter / Inbesparning	Jord	Slam-biokol	Ammonium-sulfat	Biogas
		CO2-certifikat	VA-taxa	CO2-certifikat
				Mindre humus
				VA-taxa

Det tredje scenariot kan anses vara realistiskt speciellt för den ökade röt-kammarvolymen, men det som framgår är de olika lösningarnas behov av stöd eller andra incentiv för slutprodukterna. Även ammonium-strippingens höga driftskostnad gör sig synlig vilket analyseras längre fram i rapporten. ROI användes som verktyg för att kunna jämföra de olika investeringarnas avkastning i procent på ett jämförbart vis. ROI % beräknas som $(\text{Intäkt} - \text{OPEX}) / \text{CAPEX}$. Generellt kan ROI-procenten delas in i tre nivåer:¹³

- > 15% = god
- 5 – 14% = nöjaktig
- < 5% = svag

Vid jämförelse av de olika alternativa investeringarna framgår tydligt att det mest fördelaktiga är en ökad röt-kammarvolym. Med mer röt-kammarvolym uppnås en högre utrötningsgrad, helt enkelt att en större andel av substratet har omvandlats till biogas samtidigt som andelen substrat som blir rötrest minskar. I Tabell 5 nedan redogörs för de olika investeringsalternativens slutprodukter och inbesparingsåtgärder.

¹³Wikipedia (2022) Return on investment. https://fi.wikipedia.org/wiki/Sijoitetun_p%C3%A4%C3%A4oman_tuottoaste Hämtat: 19.04.2022

Tabell 5. De olika investeringsalternativens slutprodukter och inbesparningar.

	Kompostering	Pyrolys	Amonium-stripping	3:e reaktor
Slutprodukt 1	Jord	Slam-biokol	Ammonium-sulfat	Biometan
Mängd	13 204	1 942	296	137 ton
Pris	15-20	0-150	100-140	420-1150 €/ton
Slutprodukt 2		CO2-certifikat		CO2-certifikat
Mängd		1 431		137 ton
Pris		0-100		Avtalsbaserat €/ton
Inbesparning 1		Kompostering	Nitrifikation	Kompostering år
Mängd		8 935	72	1 423 ton
Kostnad		40-60	0,40-1,00	40-60 €/ton (m3)
Inbesparning 2				Rejektvatten
Mängd				25 000 m3
Kostnad				2,20-2,80 €/m3

En mer utförlig beskrivning av slutprodukterna återfinns in marknadsintroduktion. I nulägesanalysen beskrivs även egenskaper och användning av biokol mer utförligt.

Koldioxidreducering

En intressant är kolinbindningen som uppnås med pyrolyprocessen. På årlig basis vid inblandning med krossat ris i samma förhållande som vid komposteringen fås en CO₂-reducering på 1 431 ton, vilket är ungefär en tredje del av vad biogasen sänker CO₂-utsläppen när den ersätter diesel inom transportsektorn 3902 ton. Här bör läggas märke till att om det krossade riset inte läggs med så sjunker CO₂-inbindningen till 632 ton och mängden slutprodukt alltså slambiol till 1 449 ton. Slambiolkolet är bundet för minst 100 år framöver medan biogasen ersätter ett utsläpp av fossil CO₂ till förnybar CO₂ som sedan måste framställas genom fotosyntes och tillväxt av organiskmassa. Skillnaden blir därmed att biogasen är förnybar medan slambiolkolet fungerar som en kolsänka. Räknat med att slambiolkolet har en lagringstid på 100 år det vill säga att mängden inlagrad kol degraderas med 1% per år så fås en kolsänka på cirka 113 009 ton CO₂-ekvivalenter. Om biometan räknas på en 100 årsperiod får en CO₂-reducering om 390 002 ton. Däremot om endast den tredje reaktorns ökade biogasproduktion beaktas så fås en reduktion om 427 ton CO₂-ekv per år vid ersättande av fossilt bränsle inom transportsektorn, se Tabell 6.

Tabell 6. Koldioxidbalans för de olika investeringsalternativen.

	Kompostering	Pyrolys	Amonium-stripping	3:e reaktor
CO₂-reducering	729	1 431	850	427 ton CO₂-ekv.
CO₂-utsläpp*	1 189	1 546	421	225 ton CO₂-ekv.
CO₂-balans	-460	-115	429	202 ton CO₂-ekv.
<i>*inga kemikalier har beaktats</i>				

Enligt Stormossens kartläggning av CO₂-utsläpp från verksamheten orsakar komposteringen 1189 ton CO₂-ekvivalents utsläpp årligen medan den kompenserar för 729 ton. Däremot finns ingen estimering av hur mycket den färdigställda kompostprodukten reducerar CO₂-utsläppen i jämförelse med förbränning. Det samma gäller för pyrolyprocessen att den orsakar även CO₂-utsläpp fastän den skapar en kolsänka. Produktion av kvävegödsel med Haber-bosch processen från fossil energi oftast naturgas men också kol eller

olja på andra håll i världen uppskattas orsaka mellan 2,2 – 14,2 kg CO₂-ekv/kg N.¹⁴ Stormossens produktion av ammonium-sulfat sänker därmed CO₂-utsläppen mellan 130 och 842 ton. Ytterligare så reducerar återvunnen ammonium-sulfat CO₂-utsläppen från nitrifikationsprocessen både i form av energiåtgång och avgång av kvävgas till luft, vilket enligt Stormossens kartläggning har uppskattats till 495 ton som direkta utsläpp från rejeqvattenreningsverket. Denna uppskattning är mycket generell och ska beaktas med stor osäkerhetsmarginal, men där finns oavsett en klar visning om att CO₂-balansen reduceras till det bättre med en ammonium-stripping process. Då det gäller produktion av biometan för transportsektorn så renas koldioxiden bort som då släpps ut till luften i dagsläget, motsvarande 225 ton CO₂-ekv från en ökad uttrötningsgrad. Många av dessa utsläpp kan kategoriseras som utsläpp av förnybar CO₂.

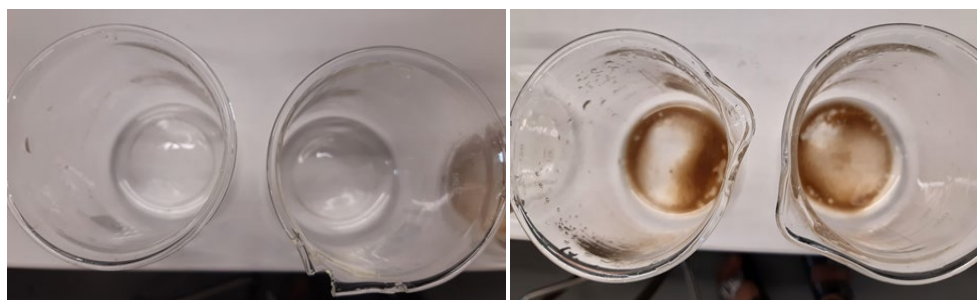
Ammonium-stripping

Huruvida ammonium-stripping med ånga skulle vara möjligt vid Stormossen fastställdes genom analys av parametrarna i Tabell 7.

Tabell 7. Analysresultat och volymer för rejeqvatten vid Stormossen.

	BR1 - Slam	BR2 - Bioavfall
Kväveprotein	0,4	0,8 %
pH	8,3	8,2
Fast substans, SS	530	5 400
Total kväve, N-tot	1 300	2 100
Ammonium, NH ₄	1 200	1 300
Kalcium, Ca	79	240
Flöde med.	10	15
Volym	41 019	22 758
Temperatur	25-30	25-30

Driftsflödet är beräknat som medeltal för 312 dygns drift dygnet runt, 24h. En första indikation är halten ammonium som finns tillgängligt. Desto högre halt desto bättre utbyte per inmatad kubik rejeqvatten och tillförd värme i form av ånga. Processens är beräknad att kräva ungefär 80 kg ånga per tillförd kubik rejeqvatten, vilket resulterar i en energiåtgång på cirka 3 214 MWh årligen. Det motsvarar cirka 45 kWh/kg NH₄ som återvinns i detta fall 72 051 kg NH₄. El åtgången har beräknats till drygt 5 kWh/kg NH₄ eller 383 MWh årligen. Återvinningsgraden är estimerad till 80-85% av tillförd ammonium till kristallint ammonium-sulfat på 20% med en årlig produktion på 296 ton. Åtgången av svavelsyra är uppskattad till 3 kg/NH₄, totalt cirka 216 153 kg per år. Däremot tyder den höga halten fast substans och kalcium på att det finns risk för koagulering i stripperkolonnen då värme tillförs. Fast substans leder även till nedsmutsning av bärarmaterial i kolonnerna som används för att öka kontaktytan i processen. Därför är tillräckligt ren ingående vätska nödvändig. Därför genomfördes ett basiskt kokprov för att få en indikation om risken, se Figur 5.



Figur 5. Synlig observation vid basiskt kokprov av Stormossens rejeqvatten.

¹⁴ Ahlgren (2015) Produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi - En översikt av teknik, miljöeffekter och ekonomi för några alternativ. <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/3541392/5268286.pdf> Hämtat: 19.04.2022

Av figuren framgår tydligt att rejektivatten från slamreaktorn inte utgör något problem och kan hanteras i en ammonium-stripping process utan större risk för koagulering i kolonnerna. För att åtgärda detta problem gjordes pilotförsök med en elektrokoaguleringsanläggning av Axolot för rejektivattnet från bioavfallsreaktorn, se Figur 6.



Figur 6. Test av elektrokoaguleringsanläggning vid Stormossens avvattningsstation. Foto: Mikael Åbacka, Axolot

Elektrokoagulerings tekniken valdes för att den inte påverkar ammoniumhalten i vattnet medan fastsubstans, fosfor och övriga föroreningar avlägsnas via toppen av processkolonnen. Själva tekniken bygger på användning av el för att få de fasta partiklarna att koagulera och stiga till ytan. Det fungerar som en elektrolys med hjälp av elektroder antingen järn eller aluminium, alternativt en kombination för att skapa en flotation. Den huvudsakliga driftskostnaden uppstår till följd av elbehovet. Även en liten mängd flockulantmedel behövs samt att elektroderna behöver bytas. Tekniken uppfyllde önskade krav på rejektivattenreningen att sänka halten fast substans och kalcium för att förhindra avlagringar i kolonner under ammonium-stripping processen se Tabell 8.

Tabell 8. Analysresultat vid test av elektrokoagulering för rening av rejektivatten från bioavfallsreaktorn vid Stormossen.

	N Protein	SS	N-tot	S-tot	P	NH ₄ -N	Ca
In	0,9	4 000	1 900	73	91	1 300	240 mg/l
Ut	0,5	1 600	1 100	52	18	900	68 mg/l
Reduktion	44	60	42	29	80	31	72 %

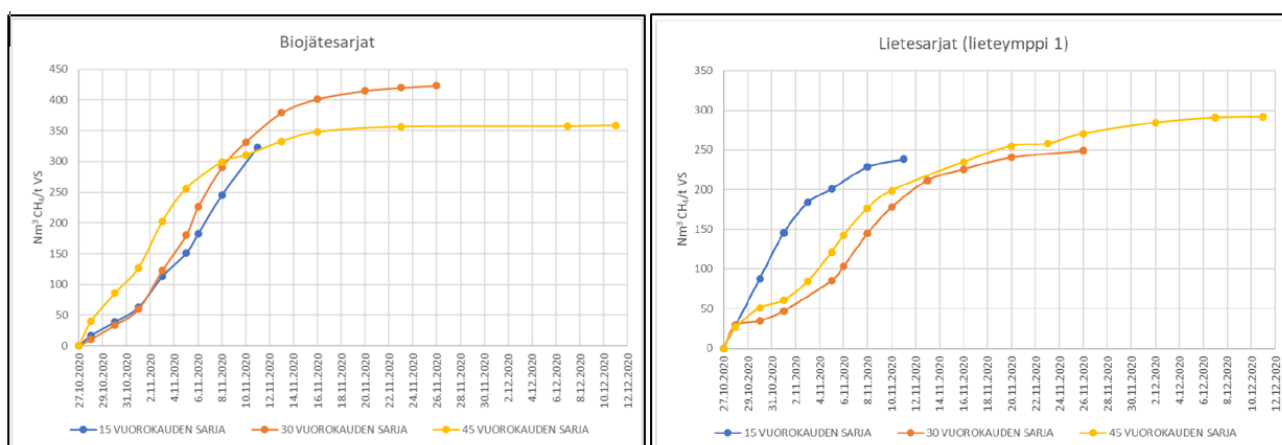
Under testet uppdagades problem med höga svavelhalter varför en aluminium elektro användes för att neutralisera det ingående rejektivattnet. Om renare vatten ut önskas så kan recirkulationsgraden av renat vatten ökas, vilket leder till ökat behov av reningsceller. Stormossen uppnådde önskat resultat utan inblandning av renat vatten. Elektrokoagulerings tekniken i sig är också en potentiell återvinningsteknik av näringsämnen eftersom de fås i en mer koncentrerad fas. Investerings- och driftskostnader är sekretessbelagda och mycket beroende på vilken typ av vatten som ska renas. En alternativ lösning för att få bukt med Ca-halterna skulle vara att göra en mer traditionell kalknings- mjukgörningsprocess med släckt kalk (Ca(OH)₂). Testet gav upphov till eftertanke kring huruvida en end-of-pipe lösning är rätta vägen att gå främst med tanke på att allt större del av biogasen uppgraderas och säljs till transportsektorn vilket sänker självförsörjningsgraden av el.

Ökad utrötning

Enligt marknadsstrategin för uppgraderad biogas kommer produktionstaket av rå biogas och uppgradering till biometan emot redan år 2024. Därmed kartlades nuvarande biogasprocess noggrannare för att hitta andra påverkningsmöjligheter. Dessa kan förenklat sagt delas in i tre lösningar enligt svårighetsgrad:

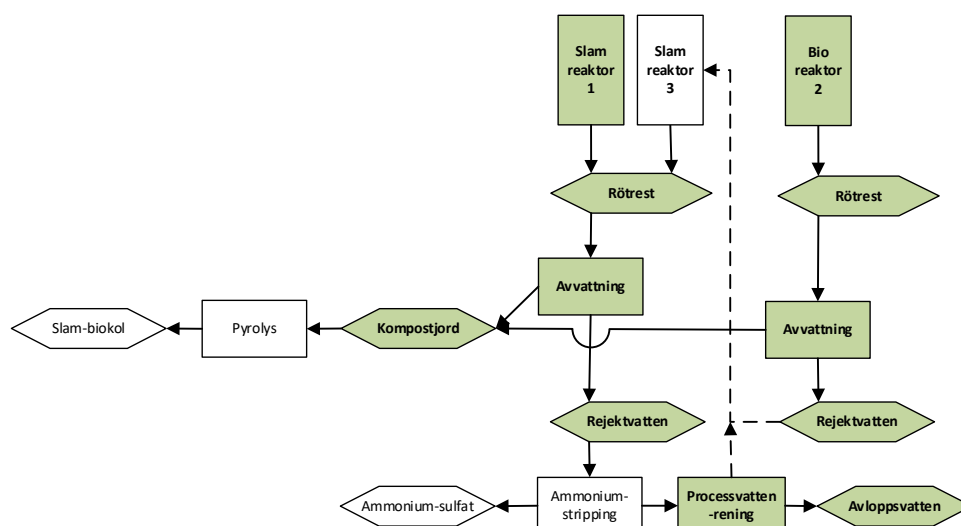
1. Sänkning av rötningstemperaturen från 55°C till hög mesofilprocess på 42°C. Detta förbättrar avvattningsegenskaperna då temperaturen är lägre samt sänker ammoniumhalten och svavelvätet. Dessutom åtgår mindre energi för uppvärmning.
2. Ökad recirkulation och omrörning i reaktorn med hjälp av en bottenpump som pumpar upp substrat från botten av reaktorn till inloppet för att blandas med nytt material.
3. Ökad röttningsvolym för att öka biogas utbytet av befintligt substrat samtidigt som rötrestmängderna sänks och en större del av rejektvatten kan recirkuleras.

Sänkning av temperaturen till 42°C sänkte den fasta substansen i rejektvatten med cirka hälften, vilket ökar förutsättningarna för ammoniumstripping. Installation av en recirkulationspump slutfördes sista veckan i april och har inte hunnits utvärderas. Ytterligare utfördes utröttningsförsök för att fastställa hur mycket biogas som ytterligare kunde utvinnas ur befintliga substrat, se Figur 7.



Figur 7. Utröttningsförsök för fastställande av kvarvarande biogaspotential i Stormossens rötrest. Bioavfalls rötrest i diagrammet till vänster och slamrötrest till höger.

Utröttningsförsöket visade att med nuvarande mängd substrat som rötas och dess uppehållstid så kunde från slamreaktorn (BR1) ytterligare utvinnas 22-35% biogas. Detta beror på att mängderna slam som hanteras har ökat med åren och därmed har uppehållstiden sjunkit till cirka två veckor. Teoretiska beräkningar antyder också att mellan 20 och 30 % mer biogas kunde utvinnas ur slammet, vilket samtidigt reducerar mängden humus som behöver hanteras med 1 423 ton årligen. Det motsvarar ungefär en 20 % minskning i avvattnad rötrest som behöver hanteras. En exakt siffra kan fastställas för vid provdrift eftersom avvattningsegenskaperna ökar desto bättre utrötat slammet är. Bioavfallsrötningen påverkas inte desto mera av en förlängduppehållstid eftersom den redan ligger på drygt tre veckor. Därmed konstaterades att en rimlig och ekonomiskt bärande väg för att effektivisera slamhanteringen samt möjliggöra för en effektiv ammonium-stripping process är att utöka röttningsvolymen med minst 3000 m³ främst för slamrötning men med möjlighet att även röta bioavfall eftersom skärpta lagkrav kring bioavfallssortering träder i kraft 2023. Detta möjliggör även att rejektvatten från bioavfallsreaktorn kan recirkuleras och därmed avloppsvattenmängderna minskas, se Figur 8.



Figur 8. Förenklad principskiss för implementering av analyserade investeringsalternativ. Grön är existerande funktioner.

Detta processupplägg möjliggör för återvinning av kväve som ammonium-sulfat, minskar humusdelen från rötresten som behöver komposteras samt ökar biogasproduktionen där en befintlig marknad kan nyttjas. Däremot återstår fortfarande cirka 7 500 ton avvattnad rötrest som behöver komposteras varje år. Denna innehåller då utöver via lagreglerade föroreningar även plast, mikroplast och läkemedelsrester samt eventuella andra föroreningar som flamskyddsmedel och så vidare. En kommersiellt fungerande lösning här är att pyrolysera den fasta fasen för att få ett slam-biokol.

Pyrolys

Rent tekniskt torde inga större hinder föreligga vid pyrolys av slam. Utifrån resultat erhållna vid pyrolys av slam ökar koncentration av tungmetaller vid stigande temperatur, vilket är logiskt eftersom en större andel kol avgår och koncentration ökar. Vid temperaturer kring 450°C ökar koncentration med cirka 20 % medan det vid 500°C sker en ackumulering på 45% i medeltal. Se Tabell 9 för hur en pyrolysanläggning med 500°C skulle påverka slamrötresten och dess innehåll.

Tabell 9. Ungefärlig bedömning av tungmetallhalterna i slambiol från pyrolys av Stormossens slamrötrest.

Slam	In	Ut	Gränsvärde
Cd	0,56	0,81	1,50 mg/kg TS
Cr	17,33	25,13	300,00 mg/kg TS
Cu	293,33	425,33	600,00 mg/kg TS
Hg	0,28	0,41	1,00 mg/kg TS
Ni	25,67	37,22	100,00 mg/kg TS
Pb	9,80	14,21	100,00 mg/kg TS
Zn	589,05	854,12	1500,00 mg/kg TS
As	3,59	5,21	25,00 mg/kg TS

För bioavfallet är värdena för ingående substrat lägre eller lika som för slammet. Vid analys organiska föreningarna (C, H, S, N, O) samt andra parametrar var det främst klor (Cl) för slammet som sticker ut se Tabell 10.

Tabell 10. Analysresultat från avvattnad rötrest.

	Slam	Bioavfall
Mängd	7 243,00	1 692,00 ton
Torrsubstans	28,90	27,30 %
Aska	45,00	31,90 %
O	6,40	5,60 %
O	17,00	20,80 % TS
C	10,90	10,20 %
C	28,80	37,70 % TS
S brännbar	0,45	0,14 %
S brännbar	1,19	0,53 % TS
N	1,39	1,07 %
N	3,68	3,95 % TS
H	1,65	1,38 %
H	4,34	5,10 % TS
Cl	2 200,00	210,00 g/kg TS
Ca	29,00	32,00 g/kg TS
Mg	4,90	4,30 g/kg TS
Na	0,53	3,00 g/kg TS
K	1,60	5,90 g/kg TS
P	27,00	9,80 g/kg TS

En klorhalt på 2,2 % är i sig inget stort problem. Det renas bort o avgasreningsskrubbern där klore neutraliseras med natriumhydroxid (NaOH) samt ett aktivt kolfilter för de lättflyktiga metallföreningarna. Den främsta konsekvensen av ett högt klorvärde är att det höjer kemikalieåtgången. Andra kemikalier som åtgår är svavelsyra för neutralisering av ammoniakgasen som uppstår vid förtorkning av slammet. För att hålla pyrolysanläggningen så självförsörjande på energi som möjligt kan träflis blandas med om samma förhållande används som vid komposteringen utgör det cirka 30 %.

DISKUSSION

En biogasanläggning är i princip endast ett mellansteg för hantering av olika substrat, vissa renare så som från jordbruket och andra mer problematiska så som avloppsslam. Råvaran uppstår utanför anläggningen och slutanvändningen av rötresten sker också utanför biogasanläggningen, bort sett från vid täckning av deponier vilket avtar vartefter de tagits ur bruk och sluttäckts. Mycket förenklat sagt så är den effektivaste och billigaste rötresten att hantera den som inte uppstår. Historiskt sätt var det också därför som avloppsslam började rötas i Storbritannien och Tyskland på 18-hundratalet för att minimera slammängderna och energin som uppstod kunde gottgöras. Detta enkla faktum kvarstår ännu idag plus att marknaden för uppgraderad biogas (fordonsgas) har utvecklats och olika stödmekanismer inrättats. Därav uppnås dels en god inbesparning med att röta substratet längre tid för att omvandla så mycket som möjligt till biogas som i sig har ett högt värde, samt i Finland även berättigade till "bioticket" då det faller inom ramen för distributionsskyldigheten.

Att röta substrat längre för att omvandla det till energi och minska på rötrestmängderna löser dock inte återföringen av näringsämnen till jordbruk eller andra ändamål. Precis samma mängd näringsämnen finns kvar samt i en aningen högre koncentration. Därför utesluter inte som i detta fall en investering i utökad reaktorvolym att investering i förädlingstekniker görs. Däremot måste investeringar göras i rätt ordning där marknaden är mogen och en utökad rötningskapacitet är den investering som ger bäst avkastning med mest kända faktorer både gällande drift och marknad av slutprodukten.

Den utökade rötkammarvolymen förbättrar förutsättningarna för ammonium-stripping i form av renare rejektvatten från avvattningsprocessen samt aningen högre koncentration av ammonium. Det främsta problemet med ammonium-stripping processen är den höga energi- och svavelsyraförbrukningen. Mängden svavelsyra kan inte påverkas desto mera utan kvarstår. Däremot kan energiförbrukningen granskas från flera håll, t.ex. om ånga tillverkas med hjälp av biogas handlar kostnaden till stor del om hur biogasen värderas. I detta fall användes fjärrvärmepriset men om biogasen annars skulle facklas så kunde ett noll pris övervägas. För Stormossens del skulle det inte vara praktiskt genomförbart eftersom största delen av biogasen säljs till transportsektorn och resterande används för elproduktion. Andra alternativ vore att få tillgång till ånga från t.ex. avfallsförbränningsverket men den ångan säljs redan som sådan till el- och fjärrvärmeproduktion. Därmed vore ett alternativ att se på alternativa processutformningar kring hur ammonium-strippingen genomförs för att kunna gå ner i temperatur till 50-60°C. Då kunde spillvärme från gasmotorn eller gasuppgraderingen användas. Orsaken till att alternativet med ånga valdes är den höga återvinningsgraden av ammonium ända upp till 95%. Även erfarenheter från andra biogasproducenter kring vilka lösningar som har fungerat väl antydde att ång-stripping fungerat bättre än ammonium-stripping med luft. Om luft används som avdrivningsmedel behöver pH först justeras med natriumhydroxid (NaOH) alternativt kan koldioxid användas och kemikalietillförseln möjligen undvikas. Speciellt om vätskan har en god buffertförmåga kan CO₂-stripping steg vara lönsamt. Även biogas har använts som avdrivningsmedel. Med ånga som medel slipper man denna extra kemikalietillförsel.

Med en lägre halt av ammoniumkväve i rejektvattnet kan en större del recirkuleras utan risk för ammoniakinhibering i rötningsprocessen. Vissa biogasproducenter har sin ammonium-stripping process integrerad med en evaporationsanläggning (avdunstning) var man får ut en koncentrerad rötrest och rent vatten. Evaporation är i sig också en energikrävande process och eftersom Stormossen har tillgång till grundvatten samt att marknad saknas för den koncentrerade rötresten så utreddes inte denna processlösning djupare. Även det dyrare konstgödselpriset beaktades i investeringskalkylerna men eftersom mängden ammoniumsulfat är relativt låg ger inte heller det en märkbart bättre ekonomiskförutsättning. Det är först och främst halten ammonium per kubik rejektvatten som förbättrar möjligheten till genomförande. En högre halt ammonium ger mer slutprodukt per tillförd värmeenergi. De högre gas och

konstgödselpriserna förbättrar i sig inte heller förutsättningarna eftersom metallpriserna stigit i nästan samma takt efter invasion av Ukraina.

En alternativ processutformning för att kringgå problematiken med icke tillräckligt ren kvalitet på ingående vätska är att undvika användandet av bärarmaterial. Det leder till att fler kolonner behövs för att öka kontaktytan under processen, vilket ger högre investeringskostnader.

Även om kvävet kan återvinnas och användas som kvävegödsel så återstår rejektvattnet från stripping-processen samt den fasta fasen av rötresten innehållande fosfor. Att pyrolys valdes som en potentiell lösning är dess goda reningsegenskaper av läkemedel, plaster och mikroplaster samt patogener. Det andra tungt vägande argumentet är att om alternativet är förbränning av avloppsslammet så bibehåller pyrolyprocessen cirka hälften av kolet och en kolsänka skapas. Denna möjlighet har dessutom införlivats i European Biochars metodologi, vilket möjliggör försäljning av CO₂-certifikat via tjänster så som puro.earth. rent tekniskt är pyrolys en kommersiellt fungerande process. Det finns givetvis tekniska hinder som bör lösas t.ex. om pyrolysoljan kan brännas inom processen för att undvikas och val av transportörer om det är icke homogena material som ska pyrolyseras så som slam blandat med träflis. Även energibalansen kan vara svår att uppnå om inget stödmaterial blandas in i processen, vilket det är tänkt att göras med 20-30% krossat trädgårdsavfall. Det största frågetecken är vad det producerade slambioolet ska användas till samt dess karaktär och egenskaper. Utöver den relativt höga investeringskostnaden är också driftskostnaden så pass hög att om ingen inkomst erhålls för slambioolet blir den jämförbar med kompostering där en säljbar slutprodukt fås. Däremot finns det troligen spelrum i beräkningarna för pyrolysens driftskostnad samt möjlighet till ytterligare inbesparningar i form av komposteringsfält och en betydligt snabbare process på en till några timmar jämfört med minst 10 månader för kompostering.

SLUTSATS

Biogasanläggningarna är en mycket lämplig del i livsmedelsproduktionskedjan där näringsämnen som importerats till tätorterna kan återvinnas ur avloppsreningsverksslammet och bioavfallet. De jordbruksbaserade biogasanläggningarna är likaså en mycket bra knutpunkt för återvinning av näringsämnen ur djurgödsel. De två olika typerna av biogasanläggningar har olika förutsättningar och behov av reningskrav för att kunna återföra rötresten som näring till jordbruket. Vid en väl placerad jordbruksbaserad biogasanläggning kan rötresten i många fall avsättas enkelt medan slambaserad rötrest kräver mer förädling om den ska accepteras inom jordbruket.

- Ett helhetsperspektiv och livscykelanalys av olika rötrestförädlingstekniker i kombination med biogasanläggningen och dess rötrest behövs för att kunna fastställa dess hållbarhetsinverkan.
- Den mest kostnadseffektiva lösningen är att minska rötrestmängden genom ökad utrötningsgrad för att erhålla biogas där marknad och stödmekanismer finns på plats jämfört med för återvinning av näringsämnen. Ingen av de undersökta teknikerna bär sig rent ekonomiskt i dagsläget när de jämförts med utvidgad rötkammarvolym utifrån återbetalningstid och avkastning på investerat kapital (ROI). Det leder till att investeringar måste göras i en prioriterad ordning utifrån ekonomiska grunder.
- Tekniskt är både ammonium-stripping och pyrolys genomförbart. Det största hindret med ammonium-stripping är dess energi- och kemikalieförbrukning varför en lösning integrerad till nyttjande av spillvärme kan vara mer lönsamt. En pyrolysanläggning består av många olika processteg vilket leder till både hög investerings- och driftskostnad.
- Både ammonium-stripping och pyrolys ger rena slutprodukter ett kvävegödselmedel och ett fosforgödselmedel. Ammonium-sulfatet har svavel som den främst begränsande faktorn och slambiokelet har en hårt bunden fosfor som begränsande faktor.

Det största hindret med miljövänliga och hållbart producerade regionala produkter oavsett om det är biogas eller återvunna näringsämnen är den ekonomiska aspekten. Därför vore det av stor vikt att frångå det traditionella synsättet på lösningars ekonomiska innebörd och i stället se på deras värden för den regionala ekonomin och miljön ur ett hållbarhetsperspektiv.

REFERENSLISTA

- Ahlgren (2015) Produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi - En översikt av teknik, miljöeffekter och ekonomi för några alternativ. Hämtad från: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/3541392/5268286.pdf>
- European Biochar Foundation (EBC) (2012) European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Arbaz.
- European Biochar Organisation (2022) Guidelines for a sustainable production of biochar. Hämtad från: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf
- Fachverband Biogas (2018) Digestate as fertilizer. Hämtad från: https://caninternational.no/onebmedia/Digestate_as_Fertilizer.pdf
- Holmgren, G. (2020). Hållbar slamhantering - Betänkande av Utredningen om en giftfri och cirkulär återföring av fosfor från avloppsslam Statens Offentliga Utredningar. Stockholm, Regeringskansliet. SOU 2020:3.
- International Water Association (2019) Rethinking our nitrogen needs in the circular economy. Hämtad från: <https://www.thesourcemagazine.org/rethinking-our-nitrogen-needs-in-the-circular-economy/>
- Sandbag (2022) Smarter climate policy – CO2 emission allowance. Hämtad från: <https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/>
- Sanchez-Monedero, M. A., M. L. Cayuela, A. Roig, K. Jindo, C. Mondini and N. Bolan (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology* 247: 1155-1164.
- Seppänen et al. (2020) Gödsling med återvunnen gödsel – Planering, praxis och möjligheter i framtiden. Helsingfors: Luke.
- Sigurnjak et al. (2019) Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-) scrubbing technology. *Waste Management* 89: 265-274.
- Szymanska, M., T. Sosulski, E. Szara, A. Was, P. Sulewski, G. W. P. van Pruissen and R. L. Cornelissen (2019). "Ammonium Sulphate from a Bio-Refinery System as a Fertilizer-Agronomic and Economic Effectiveness on the Farm Scale." *Energies* 12(24).
- Systemic project (2019) Condensated ammonium water. Hämtad från: <https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/Factsheet-ammonium-water.pdf>
- Wikipedia (2022) Return on investment. Hämtad från: https://fi.wikipedia.org/wiki/Sijoitetun_p%C3%A4%C3%A4oman_tuottoaste