



Medfinansieras av
Europeiska unionen



NORRTÄLJE
VATTEN & AVFALL

ReKol

Utvärdering av kretsloppslösningar för kommunalt slam vid Lindholmen ARV

Förstudierapport

Version: 1.0

Planering och Utveckling

Författare: Donatella Acquaviva, Emma Gunnerblad, Jonathan Alm, Cecilia Hagsköld, Eyerusalem Abadii.



Innehåll

1	Sammanfattning	1
2	Inledning	2
3	Bakgrund	2
4	Metoder	3
5	Avgränsningar	4
6	Beskrivning av tekniker	4
6.1	HTC	4
6.2	Pyrolys	4
6.3	Biogas	5
7	Biokol: Egenskaper och avsättning	7
7.1	Egenskaper	7
7.2	Avsättning	7
8	Valda kriterier	9
8.1	Genomförbarhet	9
8.2	Ekonomi	9
8.3	Resurshantering	11
8.4	Utsläpp	11
8.4.1	Netto växthusgasbalans	11
9	Multikriterieanalys	12
10	Utsläppsberäkningar för flera alternativ	13
11	Diskussion	15
	Bilaga A – Processcheman för de olika scenarierna	16
	Bilaga B – Utsläppsberäkningar	20

1 Sammanfattning

ReKol projektet är ett samarbete mellan de kommunala bolagen Norrtälje Vatten och Avfall (NVAA) och Norrtälje Energi (NEAB).

Norrtälje kommun utgör över en tredjedel av Stockholms läns yta, och befolkningstillväxten beräknas vara stark under det kommande decenniet. Inom kommunen finns cirka 32 000 bebyggda fastigheter som ligger utanför verksamhetsområdet för kommunalt vatten och avlopp. Kommunen och dess kommunala bolag står inför utmaningen att hantera naturresurser på ett hållbart sätt samtidigt som de möter behoven hos en växande befolkning. Slammet från enskilda avloppsanläggningar (septikslam) påverkar de kommunala avloppsreningsverken negativt. Årligen tas mellan 45 000 och 60 000 m³ slam med en torrsubstanshalt (TS) på cirka 0,5 % emot på ett fåtal reningsverk. Detta försämrar reningsprocesserna och påskyndar behovet av kapacitetsutbyggnad. Mängden slam förväntas dessutom öka under de kommande åren.

Projektet har: i) utvärderat en lösning där septikslam avvattnas separat och fyto Remediering implementeras, samt ii) undersökt förutsättningarna för en kretsloppsanläggning i Norrtälje som omvandlar kommunalt slam till resurser.

Projektet resulterar i två rapporter som motsvarar de två ovan nämnda målen.

ReKol projektet bidrar till att uppfylla åtta av FN:s sjutton globala mål.



Projektbudgeten är 1,5 miljoner kronor. EU finansierar 600.000 kr och Tillväxtverket finansierar 150.000 kr.

2 Inledning

Denna rapport redovisar en undersökning som genomförts för att jämföra två tekniker för slamhantering vid Lindholmen avloppsreningsverk: biogasproduktion med gasmotor för elproduktion respektive pyrolys.

Rapporten beskriver dels den metod som använts för att samla in bakgrundsinformation, dels den metod som använts för att bedöma de två teknikalternativen.

3 Bakgrund

Den europeiska lagstiftningen för hantering av avloppsvatten och avloppsslam genomgår en omfattande omvandling. Med antagandet av det reviderade avloppsvattendirektivet år 2024 och den pågående översynen av slamdirektivet (86/278/EEG) sker en tydlig förskjutning mot skärpta miljökrav, ökad resursåtervinning och klimatneutralitet.

Det uppdaterade avloppsvattendirektivet ställer mer ambitiösa krav, inklusive obligatorisk näringsämnesreduktion, avancerad rening av mikroföroreningar samt mål om energineutralitet för reningsverk senast 2045.

Samtidigt förväntas den kommande revideringen av slamdirektivet ta upp moderna föroreningar såsom mikroplaster, PFAS och läkemedelsrester, vilket kan komma att begränsa spridning av obehandlat eller otillräckligt behandlat slam på mark.

Naturvårdsverket berättar att EU utreder olika tekniker för behandling av slam, där monoförbränning och pyrolys lyfts som alternativ. Enligt Naturvårdsverket inväntar de nya regelverk kring slamhantering från EU, som skulle träda i kraft inom 5 år. (EcoTopic, 2024).

År 2018 gav den svenska regeringen i uppdrag att utreda ett möjligt framtida förbud mot att sprida avloppsslam på mark, samt att ta fram förslag på krav för att återvinna fosfor ur slammet (Kommittédirektiv 2018:67). I den statliga utredningen (SOU 2020:3) presenterades två alternativ: Det ena alternativet innebär ett totalförbud mot all slamspridning, oavsett marktyp. Det andra tillåter att hygieniserat och kvalitetssäkrat slam även i framtiden får spridas på produktiv jordbruksmark.

Utredningen föreslog också ett krav på att minst 60 % av fosfor i avloppsslammet ska återvinnas från reningsverk som betjänar fler än 20 000 personer.

Om ett förbud mot slamspridning införs i framtiden kommer det att krävas nya lösningar för hur VA-organisationer hanterar sitt slam, till exempel genom tekniker för energiutvinning eller näringsåterföring på annat sätt.

4 Metoder

Denna undersökning har genomförts genom intervjuer med relevanta aktörer. Projektgruppen deltog i konferensen om slambiol i oktober 2024, där vi intervjuade teknikleverantörer, forskare, konsulter och kommunala tjänstepersoner.

Inom ramen för ReKol-projektet har vi under 2025 genomfört en litteraturstudie samt intervjuat Aleksandra Lazic, utvecklingsingenjör på Roslagsvatten. Vi har även besökt Testbädd Ellinge och intervjuat David Gustavsson, forskare på VA-Syd och Sweden Water Research.

För att jämföra biogas och pyrolys har vi genomfört en multikriterieanalys (MCA). Multikriterieanalys är en metod som används för att fatta beslut när flera olika faktorer eller kriterier måste vägas samman. Den är särskilt användbar i situationer där beslutsunderlaget är komplext och där olika alternativ måste bedömas utifrån både kvantitativa och kvalitativa aspekter.

Analysen genomfördes enligt följande steg:

- Först identifierade vi vilka alternativ som skulle jämföras. De alternativ vi valt att jämföra är biogas med gasmotor och pyrolys (med behandling av slam endast från Lindholmen ARV);
- Därefter har vi valt vilka kriterier som ska bedömas, vilket framgår av tabellen i kapitlet 8;
- Vi har tilldelat varje kriterium en vikt på en skala från 0 till 1 utifrån dess relativa betydelse för beslutet;
- Varje alternativ får en poäng på en skala från 1 till 3 för varje kriterium;
- Vi har därefter viktat varje poäng för att få ett sammanlagt betyg. **Betyg = vikt x tilldelad poäng;**
- Genom att summera betyg får vi en samlad bild av vilket alternativ som är mest fördelaktigt utifrån de valda kriterierna.

Multikriterieanalysen gav ett nästan likvärdigt resultat för teknikerna. Vi beslutade därför att en avgörande parameter skulle vara minskningen av koldioxid i förhållande till investeringskostnaden. Vid beräkningen av CO₂-utsläppen valde vi även att jämföra ett extrascenario, det där en pyrolysanläggning skulle hantera slammet från Lindholmen, Kapellskär och Hallstavik.

Projektgruppen består av: Emma Gunnerblad, Jonathan Alm, Donatella Acquaviva och Eyerusalem Abadii från Norrtälje Vatten och Avfall, Jens Krogell från Norrtälje Energi.

5 Avgränsningar

Investeringskostnad (CAPEX) för pyrolysanläggningen är uppskattad från Roslagsvattens budget. Driftkostnader (OPEX) för pyrolysanläggningen har uppskattats efter samtal med teknikleverantören AquaGreen och efter studiebesök på testbädd Ellinge.

Uppgifterna om CAPEX för biogasanläggningen är uppskattad efter premiliminärt projektering som NVAA har genomfört för några år sedan. OPEX är räknat efter en schablon.

6 Beskrivning av tekniker

De tekniker som inledningsvis har övervägts för att möjliggöra en cirkulär ekonomi för avloppsslam är: hydrotermisk karbonisering (HTC), pyrolys och biogas.

6.1 HTC

HTC-tekniken bygger på en process där slammet eller andra substrat behandlas under högt tryck (>20 bar) och under hög temperatur (180-260 °C). HTC-processen genererar hydrokol som kan avvattnas mekaniskt till höga torrhalter (>60 % TS) (Svenskt Vatten).

Forskning har visat att HTC inte effektivt bryter ner PFAS. Istället sker en omfördelning av PFAS-föreningarna. En del PFAS kan binda till hydrokol, vilket skapar problem vid återföring av det fasta materialet till mark; en stor andel PFAS hamnar dock i processvattnet, som då kräver vidare behandling, exempelvis med aktivt kol, jonbytarfilter eller avancerad oxidation, innan det kan släppas ut eller återanvändas.

Intervjuer och omvärldsbevakning visade också att HTC inte är lika mogen som biogas eller pyrolys. Roslagsvattens testprojekt visade dessutom att hydrokol tenderar att utveckla mögel. Mot bakgrund av ovanstående information beslutade projektgruppen att gå vidare med fortsatt undersökning av biogas- och pyrolysteknik.

6.2 Pyrolys

Pyrolys är en termokemisk process där organiskt material upphettas i frånvaro av syre eller med mycket begränsad syretillförsel. Vid temperaturer mellan cirka 300 och 700 °C bryts materialets organiska föreningar ned utan att förbrännas. Processen resulterar i tre huvudsakliga fraktioner: en fast kolhaltig rest (biokol), gasformiga produkter (pyrolysgas) samt en vätska (bioolja).

För behandling av avloppsslam innebär pyrolys att slammet kan omvandlas till en stabil, näringsrik och kolrik produkt, biokol, som potentiellt kan användas som jordförbättringsmedel eller kolsänka. Samtidigt reduceras slamvolymen avsevärt. Vid tillräckligt höga temperaturer kan pyrolys även bidra till destruktion av skadliga organiska föroreningar, såsom PFAS och läkemedelsrester.

En pyrolysanläggning kan bli energineutral vid användning av orötat slam.

Det finns 52 fullskaleanläggningar runt om i världen, varav 35 i Asien. I Europa finns det 6 i Tyskland, 2 i Danmark (samt ytterligare 2 under uppförande) och en anläggning är under uppförande i Sverige.

Identifierade leverantörer i Europa: VOW ASA, Pyreg, AquaGreen, Next Generation Elements (NGE).

- **VOW ASA:** Producerar pyrolysanläggningar för fartyg. Det är en teknik att ha i åtanke för framtiden.
- **Pyreg:** Erbjuder enbart pyrolysdelen, medan torkningen behöver lösas av en annan leverantör.
- **Next Generation Elements (NGE):** Tork- och pyrolysenheterna är integrerade i samma system. Lösningen är mer lämpad för större avloppsreningsverk än Norrtäljes. Tekniken förefaller inte vara lika mogen som AquaGreens, utan är fortfarande i demonstrations- eller tidig kommersiell fas.
- **AquaGreen:** Tillhandahåller både torkanläggning (inklusive värmeväxlare för värmeåtervinning) och pyrolys. Lösningen är modulär och kan skalas upp. Kommersiella installationer finns i Danmark och Sverige (under uppförande).

I dagsläget är AquaGreen den leverantör som har högst teknikmognad, och därför har projektgruppen beslutat att fortsätta undersökningen med AquaGreens teknik.

6.3 Biogas

Biogas är en vanlig teknik som används i de flesta större reningsverk bl.a. för att reducera slammängden. Anläggningen på Lindholmen är gammal och behöver rustas, status på rötkammare är okänd.

För att kunna jämföra biogas med pyrolys har en tillverkare/återförsäljare av biogasanläggningar med kringutrustning intervjuats, utredningen är alltså väldigt enkelt genomförd.

På Lindholmen produceras i nuläget ca 550 000 - 600 000 m³ biogas per år, vilket absolut är tillräckligt för en gasmotor som genererar el. Gasmotorerna kan köras på gas med en metanhalt på minst 54%, oftast ligger ARV-rötgas på 60 - 62%.

Ibland behöver rågasen renas från siloxaner (isåfall aktivt kolfilter) men det är inte alltid det behövs. Innan en gasmotor installeras analyserar man gasen för att utreda ev reningsbehov. Elverkningsgraden i gasmotorer är ca 40%. 600 000 m³/år rågas med 60% metan skulle ge en elproduktion på ca 160 kW (och 240 kW värme istället för 400 kW som nu när allt blir värme). I nuläget är det ca 1/3 av värmen som används på Lindholmen (uppvärmning av biogasreaktor och lokaler), resten av gasen facklas. Spillvärmen ifrån gasmotorn skulle alltså räcka för att täcka värmebehovet på Lindholmen.

En lagom stor motor är t.ex. Cento 160, som kostar ca 2,5 Mkr exklusive elcentral mm, kanske 0,5-1 Mkr till för el- och värmeanslutning. Gasmotorn skulle kunna producera ca 1 400 MWh/år, Lindholmens elförbrukning ligger på lite drygt 1 600 MWh/år, så nästan hela förbrukningen skulle kunna produceras med gasmotorn.

Om man räknar på en elkostnad på 1 kr/kWh så skulle en elmotor spara ca 1,4 Mkr/år.

Renoveringskostnaden för biogasanläggningen är väldigt svår att uppskatta eftersom statusen är oklar, men en helt ny gårdsbiogasanläggning i den storleksordningen (inkl rötkammare, gaslager, klocka, gasmotor, fackling mm) kan kosta mellan 20 och 30 Mkr från denna leverantör (IGF Biogas). Det är inte självklart att en renovering blir billigare än en nyinstallation. Även med en ny eller renoverad biogasanläggning skulle vi ha samma mängd rötslam, med metanläckage ifrån slamlagret och höga kvittblivningskostnader. Antagligen skulle metanläckage ifrån biogasprocessen kunna minska med en nyare anläggning.

7 Biokol: Egenskaper och avsättning

7.1 Egenskaper

Pyrolysisprocessen har potential att hygienisera avloppsslam och samtidigt reducera organiska föroreningar såsom PFAS, läkemedelsrester och mikroplaster. Nästan all fosfor som finns i slammet stannar kvar i biokolet, medan andelen kvarvarande kväve är mycket liten. Kol bevaras i hög grad i biokolet genom pyrolysen, där det omvandlas till en stabil form, så kallad aromatisk struktur, som är mycket svårnedbrytbar i markmiljö. Det gör att biokol fungerar som en effektiv kolsänka och kan bidra till långsiktig kolinlagring.

Även majoriteten av de tungmetaller som finns i slammet stannar kvar i biokolet. Trots dessa egenskaper kvarstår fortfarande kunskapsluckor kring biokolets långsiktiga påverkan i markmiljö, särskilt när det gäller fosfors växttillgänglighet.

Slambiolets egenskaper beror i hög grad på det ingående slammets sammansättning samt på förhållandena i pyrolysisprocessen (temperatur och uppehållstider); t.ex. ökar högre pyrolystemperatur andelen aromatisk struktur i kolet, vilket i sin tur förbättrar stabiliteten i marken och ökar dess potential som kolsänka.

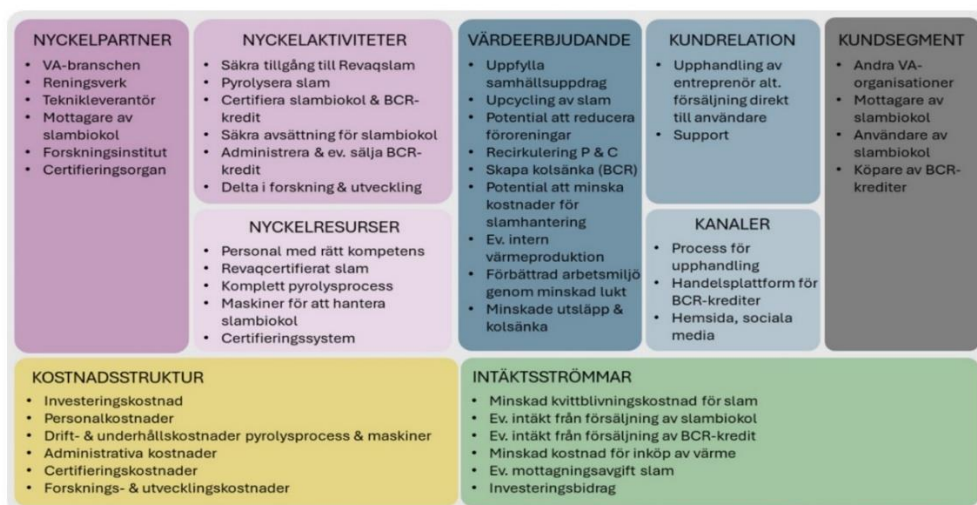
7.2 Avsättning

I dagsläget finns ingen etablerad marknad för slambiokol, och betalningsviljan är i stor utsträckning kopplad till att producenten kan garantera materialets kvalitet och funktion. Tiden det tar att bygga upp en marknad varierar beroende på användningsområde. Det är också oklart om slambiokol i framtiden kommer att klassas som avfall, likt avloppsslam, eller om det kan betraktas som en produkt, vilket skulle medföra att andra regelverk gäller.

Möjliga avsättningsområden för slambiokol är:

- Jordbruk;
- Intern användning som filtermaterial för avloppsvatten (Sylwan 2025);
- Filtermaterial vid deponier: Här har man använt biokol baserat på trädgårdsavfall, men ytterligare tester krävs för att bedöma om slambiokol uppfyller samma krav och funktion;
- I urban miljö till exempel som jordförbättring i planteringar: Även här har biokol från annat organiskt material använts tidigare, men användningen av slambiokol behöver testas vidare för att säkerställa lämplighet och miljösäkerhet;
- Övriga applikationer: Enligt teknikleverantörer säljs den mängden slambiokol som produceras i Europa som bränsle. Betong och stålindustri visar också potential för slambiokol men de ställer höga krav på slambiolets egenskaper.

I en nyligen publicerad rapport har Roslagsvatten presenterat en generell affärsmodell för slampyrolys av avloppsslam:



Tab. 6.1 – Från Roslagsvatten rapport "Slambiol – marknadspotential, kolkrediter och affärsmodeller".

I rapporten rekommenderas att varje VA-organisation utarbetar en egen affärsmodell och att olika scenarier för möjliga inkomstströmmar analyseras.

För att kunna ta fram en sådan modell krävs också data och praktiska erfarenheter från drift. Ellinge reningsverk har startat en testbädd där Va-organisationer har möjlighet att testa sitt slam, vilket skulle kunna ge information om biokol som produkt. För att delta i testbädden tillkommer en gate fee på 50 000 kr, utöver kostnader för transport och analyser.

8 Valda kriterier

För att kunna jämföra teknikerna på ett strukturerat sätt har vi identifierat ett antal kriterier som täcker tekniska, ekonomiska, miljömässiga och resurshanteringsmässiga aspekter. Kriterier har samlats under fyra kategorier:

- Genomförbarhet
- Ekonomi
- Resurshantering
- Utsläpp

8.1 Genomförbarhet

- **Teknisk mognad (baserat på TRL skala):** bedömer teknikens utvecklingsnivå;
- **Ytbehov;**
- **Driftkomplexitet/Personalbehov:** graderas från 1 (låg bemanning, enkel drift) till 3 (hög bemanning och avancerad kompetens som krävs);
- **Efterlevnad av det nya avloppsdirektivet:** med hänsyn till energineutralitet mål;
- **Arbetsmiljö**

8.2 Ekonomi

Investeringskostnad (CAPEX)

- *Pyrolys:* ~ 85 M kr
- *Biogas:* ~ 85 M kr

Driftkostnader (OPEX)

OPEX är indikativa

- *Pyrolys:*

Kostnadspost	HECLA Setores 1000 (kr/år)
Personal	1 000 000
El	688 867
Licens	152 945
Underhåll, reservdelar	663 149
TOT	2 504 961

Övriga kostnader kan tillkomma: ränta, analyser för biokol, mm.

- *Biogas* - vi använder en schablon: 5 % av CAPEX

$$\text{OPEX}_{\text{biogas}} = \sim 4 \text{ M kr/år}$$

Produktmarknadspotential

Definierat som marknadsefterfrågan och avsättningstrygghet

- *Pyrolys*: I dagsläget finns ingen etablerad marknad för slambiol. Betalningsviljan är i hög grad beroende av att producenten kan garantera materialets kvalitet och egenskaper. Tidsramen för att etablera en marknad varierar beroende på det tänkta användningsområdet. Det är fortfarande oklart om slambiol även framöver kommer att klassas som ett avfall, i likhet med avloppsslam, eller om det i stället kan betraktas som en produkt, vilket skulle innebära att andra regelverk blir tillämpliga;
- *Biogas*: Det råder osäkerhet kring om spridning av avloppsslam på åkermark kommer att tillåtas i framtiden.

Kvittblivningskostnader per år

- *Pyrolys*
 - Kvittblivningskostnader på biokol = 500 kr/ton (Källa: Slambiol: marknadspotential, kolkrediter och affärsmodeller – Roslagsvatten);
 - Mängden biokol efter pyrolys = 438 ton (efter viktninskning upp till 90%)

$$\text{Kvittblivningskostnader på biokol} = 500 \text{ kr/ton} \times 438 \text{ ton} = \mathbf{220 \text{ t kr/år}}$$

- *Biogas* (nuvarande hantering)

Kvittblivningskostnad per ton slam = 950 kr/ton slam

Mängd slam 2024 = 4 426 ton

$$\text{Kvittblivningskostnad} = 950 \text{ kr/ton} \times 4\,426 \text{ ton} = \mathbf{4,20 \text{ M sek}}$$

Elkostnadsminskning

Som beskrivit i avsnittet 5.3, en elmotor skulle spara ca 1,4 M kr/år.

8.3 Resurshantering

Kväve återvinning

- *Pyrolys*: Andelen kväve som återfinns i biokolet uppgår till 1-3 % TS
TS 2024: 734 ton
 $N_{\text{återvinning-Pyrolys}} = 7,34 - 22 \text{ ton/år}$
- *Biogas*: $N_{\text{återvinning-Biogas}} = 65,2 \text{ ton}$

Fosforåtervinning

- *Pyrolys*: Andelen fosfor som återfinns i biokolet uppgår till 5-9 % TS
TS 2024: 734 ton
 $P_{\text{återvinning-Pyrolys}} = 36,7 - 66 \text{ ton/år}$
- *Biogas*: $P_{\text{återvinning-Biogas}} = 23,3 \text{ ton/år}$

Potential kolsänka

Enligt Svenskt Vatten binds cirka 35% av kolet i marken vid slamspridning, med en kolinlagringstid på ungefär 20-30 år. Detta kan jämföras med biokol (pyrolyserade material), där den stabila kolstrukturen möjliggör en betydligt längre kolsänka på 100 – 1000 år.

Energiutbyte

- *Pyrolys*: Majoriteten av producerad syngas åtgår i pyrolyprocessen
- *Biogas*: 3500 MWh/år varav 1400MWh el, resten värme

Kvalitet på restprodukt

Vi har definierat kriteriet som attraktivitet att sprida produkten på mark.

Med tanke på risken för ett framtida spridningsförbud av avloppsslam har slambiol en högre attraktivitet.

8.4 Utsläpp

8.4.1 Netto växthusgasbalans

- *Pyrolys*: 479, 4 ton CO_{2eq}
- *Biogas*: 2 471 ton CO_{2eq}

9 Multikriterieanalys

Vi redovisar i följande tabell resultaten av multikriterieanalysen. Varje parameter har tilldelats en vikt och ett poäng.

Kategori	Kriterium	Kommentar	Vikt	Biogas + gasmotor	Pyrolys - Aqua Green	Tot Biogas	Tot Pyrolys
Genomförbarhet	Teknikmognad (TRL)	Baserat på TRL skala	0,9	3	2	2,7	1,8
	Ytbehov	Krävd yta för installation och drift	0,3	3	2	0,9	0,6
	Driftkomplexitet/Personalbehov		0,5	2	1	1	0,5
	Arbetsmiljö		0,7	2	3	1,4	2,1
Ekonomi	CAPEX	Total investering som krävs, Msek	1	2	2	2	2
	OPEX	Årliga drift- och underhållskostnader, Msek/år	0,5	2	1	1	0,5
	Produktmarknadspotential	Marknadsefterfrågan och avsättningstrygghet	0,5	2	2	1	1
	Kvittblivningskostnader	per år	0,7	1	3	0,7	2,1
	Elkostnadsminskning (gas motor)		0,5	2	1	1	0,5
Resurshantering	N återvinning	ton N/år	0,3	2	1	0,6	0,3
	P återvinning	ton P/år	0,7	3	3	2,1	2,1
	Potential kolsänka	Biokol långtidslagrar kol	0,5	1	3	0,5	1,5
	Energiutbyte	Användbar energi som produceras (MWh/år) (el+värme)	0,8	3	1	2,4	0,8
	Kvalitet på restprodukt	Attraktivitet att sprida på mark	0,3	2	3	0,6	0,9
Utsläpp	Netto växthusgasutsläpp	ton CO ₂ e/år	0,8	1	3	0,8	2,4
						18,7	19,1

Tab. 9.2 – Multikriterieanalys för att jämföra slampyrolys och biogas med gasmotor för slambehandling vid Lindholmen ARV

Multikriterieanalysen gav ett nästan likvärdigt resultat för teknikerna. Vi beslutade därför att en avgörande parameter skulle vara minskningen av koldioxid i förhållande till investeringskostnaden. Vid beräkningen av CO₂-utsläppen valde vi även att jämföra ett extrascenario, det där en pyrolysanläggning skulle hantera slammet från Lindholmen, Kapellskär och Hallstavik.

Vi visar resultat av jämförelse i kapitel 10.

10 Utsläppsberäkningar för flera alternativ

Tre alternativ har jämförts. För varje alternativ har den sparade koldioxidmängden per investerad krona beräknats över en livslängd på 20 år. Mängden besparad koldioxid beräknades i jämförelse med det nuvarande scenariot.

För varje scenario presenteras processschema och kalkyler för beräkning av koldioxidutsläpp respektive i Bilaga A och Bilaga B.

I det här avsnittet sammanfattar vi den sparade koldioxidmängden per investerad krona för de tre alternativen:

Scenario 1 : Pyrolys Lindholmens slam		
Årtig utsläpp	479 394,725	kg CO ₂ e /år
Utsläppsminskning/år	3 140 684,993	kg CO ₂ e /år
Budget (kr)	83 050 000,000	kr
Livslängd	20	år
Utsläppsminskningen över hela livslängden/investerad krona	0,756	kg CO ₂ e /kr

Tab. 10.5 - Utsläppsminskningen över hela livslängden per investerad krona för Scenario 1

Scenario 2 : Pyrolys Lindholmen+ Kapellskär + Hallstavik slam		
Årtig utsläpp	684 642,312	kg CO ₂ e /år
Utsläppsminskning/år	2 380 444,572	kg CO ₂ e /år
Budget	111 050 000,000	kr
Livslängd	20	år
Utsläppsminskningen över hela livslängden/investerad krona	0,429	kg CO ₂ e /kr

Tab. 10.6 - Utsläppsminskningen över hela livslängden per investerad krona för Scenario 2

Scenario 3 : Biogas + gasmotor		
Årtlig utsläpp	2 438 144,509	kg CO ₂ e /år
Utsläppsminskning/år	626 942,375	kg CO ₂ e /år
Budget	82 200 000	kr
Livslängd	20	år
Utsläppsminskningen över hela livslängden/investerad krona	0,153	kg CO ₂ e /kr

Tab. 10.7 - Utsläppsminskningen över hela livslängden per investerad krona för Scenario 3

Scenario 1, en pyrolysanläggning som hanterar enbart slammet från Lindholmen ARV, är det scenario som har det högsta värdet på sparade koldioxidutsläpp per investerad krona. På grund av detta resultat har NVAA beslutat att ansöka om stöd från Klimatklivet för denna lösning i oktober 2025.

11 Diskussion

I detta kapitel sammanfattar vi de huvudsakliga för- och nackdelarna med biogasproduktion och pyrolys. Båda teknikerna har olika styrkor och begränsningar sett till miljöpåverkan, teknikmognad, näringsåterföring och ekonomi.

Pyrolys är en termisk process som kan bidra till att minska innehållet av långlivade föroreningar som PFAS, organiska föreningar, mikroplaster, tungmetaller som kvicksilver och delvis kadmium. En viktig miljöfördel är möjligheten att stabilisera kol i biokol, vilket kan bidra till klimatmålen genom att minska koldioxidutsläppen.

Biokol är volymmässigt mindre än det ursprungliga slammet, vilket minskar kostnader för transport och slutlig kvittblivning, med en uppskattad besparing på cirka 4 miljoner kronor per år.

Samtidigt finns betydande utmaningar. Det råder fortfarande osäkerhet kring fosfors växttillgänglighet i biokol samt hur stabilt det bundna kolet är på lång sikt. Tekniken är ännu oprövad i större skala för detta användningsområde och kräver avancerad utrustning. Vidare genererar pyrolys ingen nettoenergi, vilket gör att tekniken inte direkt bidrar till målen i det reviderade avloppsdirektivet.

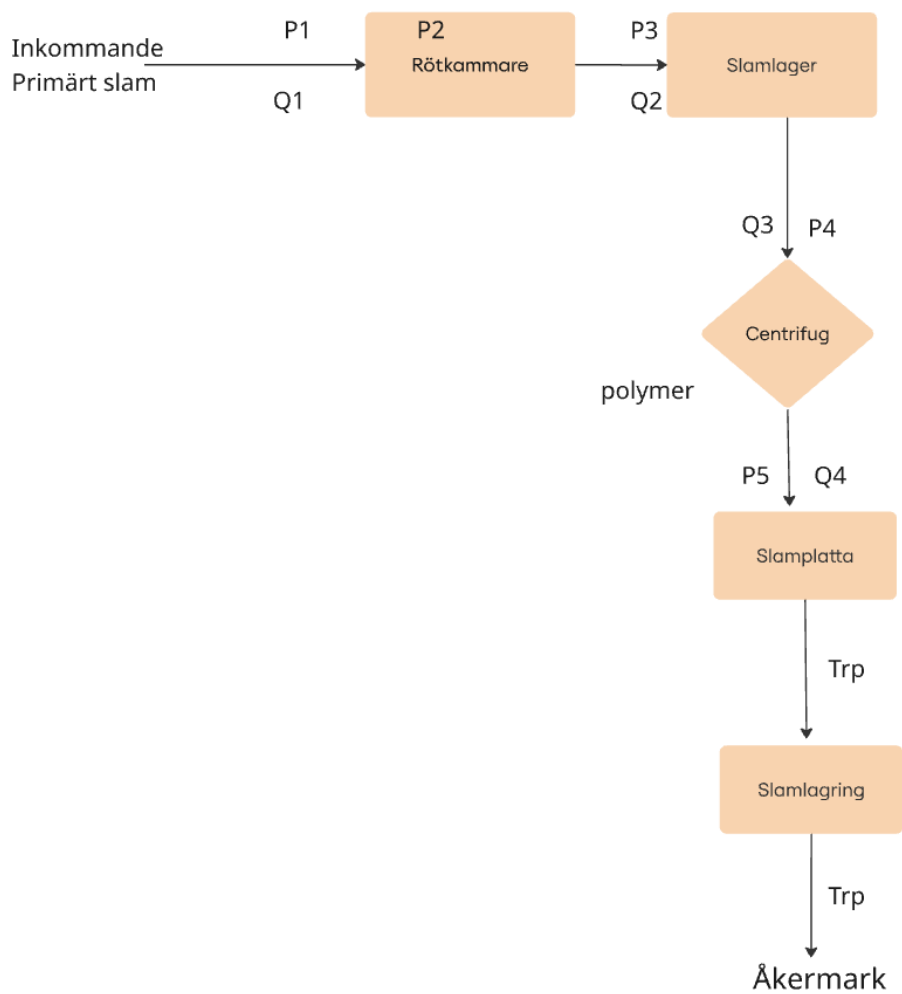
Biogasproduktion utgör ett mer välbeprövat alternativ med dokumenterade driftserfarenheter. En viktig fördel är energivinsten: En gasmotor kan exempelvis producera upp till 1 400 MWh per år från rötslam. Anläggningar för biogas är ofta enklare att bygga, driva och underhålla. Metoden möjliggör också återföring av viktiga växtnäringsämnen till jordbruksmark.

Å andra sidan innebär biogasproduktion vissa risker och nackdelar. Spridning av rötrest till åkermark kan medföra risk för kontaminering med oönskade ämnen. Metanläckage från anläggningar och transporter ger ett betydande klimatavtryck. Dessutom är rötresthantering kostsam och biogas är en brandfarlig gas, vilket ställer krav på arbetsmiljösäkerhet.

Bilaga A – Processcheman för de olika scenarierna

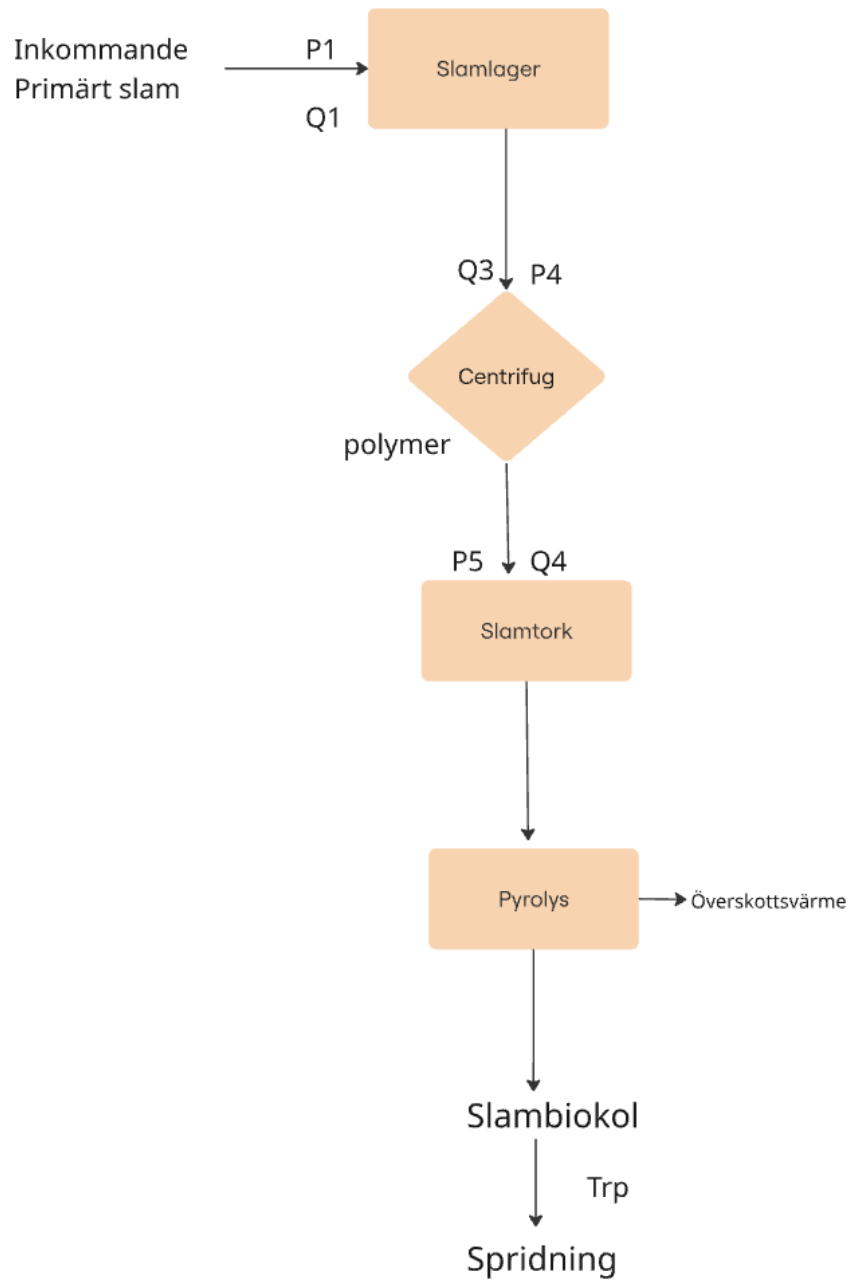
Processschema - nuläget

BASFALLET



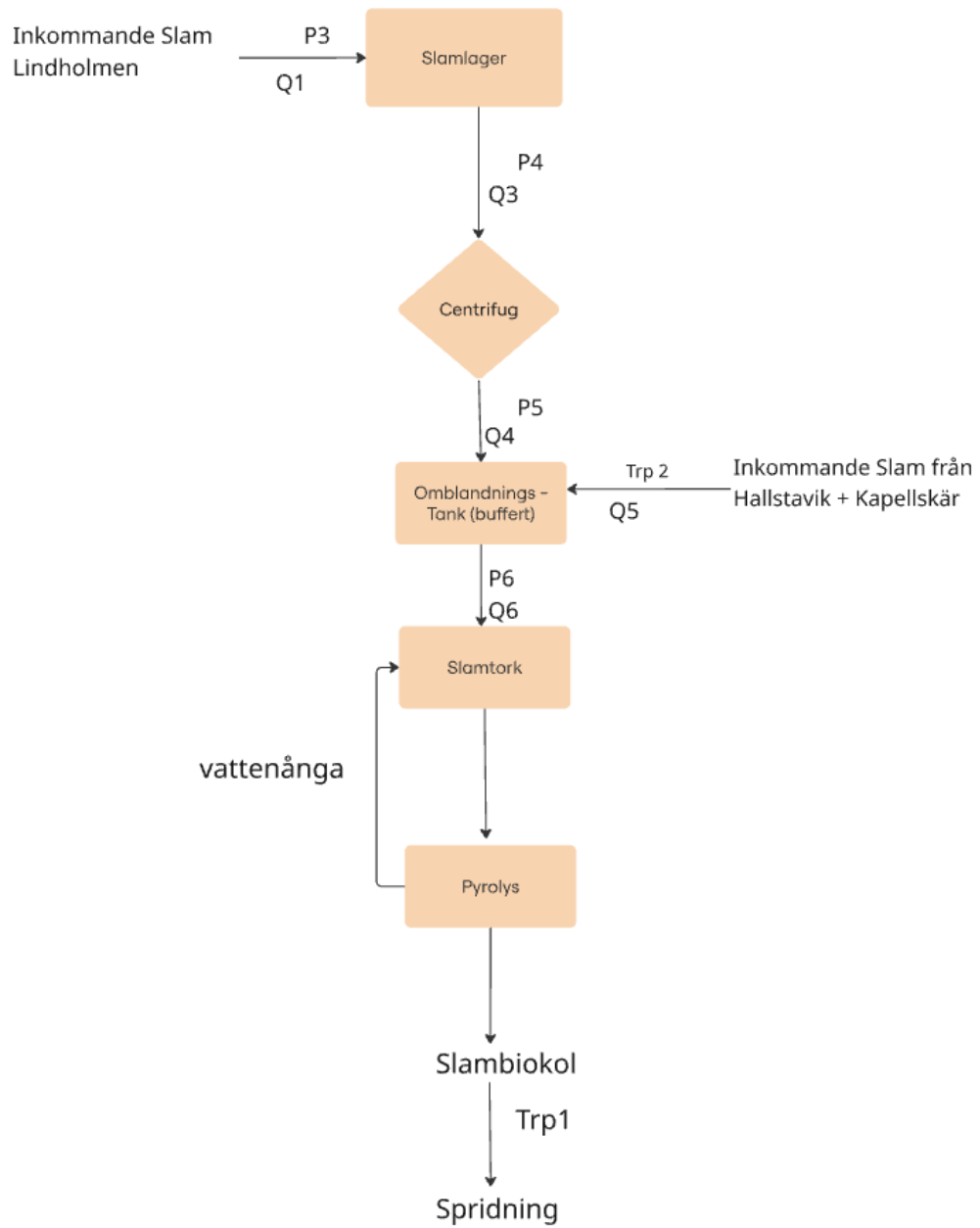
Processschema – pyrolysanläggning som hanterar enbart slam från Lindholmen ARV

SCENARIO 1

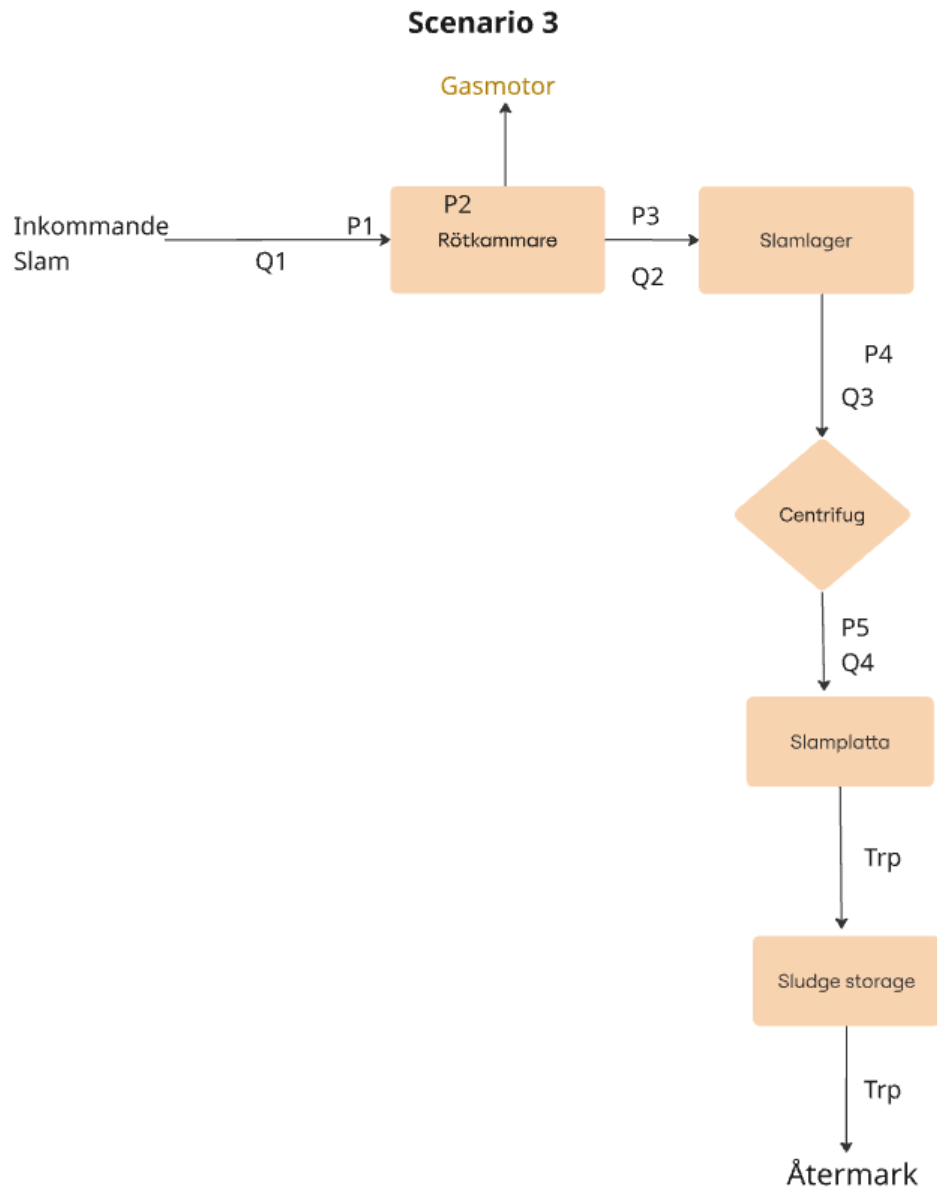


Processchema – pyrolysanläggning som hanterar slam från Lindholmen, Kapellskär och Hallstavik ARV

Scenario 2



Processchema – biogasanläggning med gasmotor vid Lindholmen ARV



Bilaga B – Utsläppsberäkningar

Utsläppsberäkningar – nuläget

SCENARIO 0 - BASFALLET

Process steg	Q 1(m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)	Referens- Faktor
Process Steg 1	49,74	18 155,10	3,07	556,45	P1 (kWh)	5 931,25	0,09	Co2 e Kg /Kwh	533,81	Naturvårdsverket, 2025
					P2 (cirkulation pump - röttkammare) (kWh)	162 060,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	14 585,40	
					Biogas utnyttjad	83 737,29	0,353	Co2 e kg/ kWh	-29 559,26	IPCC(2001) and shahabadi 2009
					Biogas fackling	264 163,64	2,67		705 316,92	Naturvårdsverket, 2025
					Olja (medelvärde)	1	288,00	Co2 g/KWh	0,29	Jenny Gode, 2011
					metanslip CH4 (kg)	11 129,08	25	Kg CO2 e/kg	278 226,91	Naturvårdsverket, 2025
					N2O (kg)	667,28	298	Kg CO2 e/kg	198 849,59	Naturvårdsverket, 2025
Tot									1 167 953,65	
Slam	Q2 (m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)	
Process Steg 2	363,10	17 792,00	2,61	463,48	P3 (kWh)	5 931,25	0,09	Co2 e Kg /Kwh	533,81	
					CH4 (kg)	9 269,63	25	kg CO2 e/kg	231 740,77	
					N2O (kg)	555,79	298	Kg CO2 e/kg	165 625,81	
Tot									397 900,40	
Slam	Q3 (m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)	
Process steg 3	130,28	47 552,20	2,61	1 238,73	Polymerer (kg)	10 823,00	18	CO2 kg /ton	194,81	Laura Snip 2009, Melin He 2024
					P4 (kWh)	9 198,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	827,82	
					Centriflug (kWh)	132 860,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	11 957,40	
					CH4 (kg)	24 774,70	25	Kg CO2 e/kg	619 367,41	
					N2O (kg)	1 485,45	298	Kg CO2 e/kg	442 663,70	
Tot									1 075 011,14	
Slam	Q (m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)	
Process steg 4		4 426,00	17	734,00	P5 (kWh)	12 775,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	1 149,75	
					slamlagring - CH4 (kg)	14 680,00	25	Kg CO2 e/kg	367 000,00	
					slamlagring - N2O (kg)	880,19	298	Kg CO2 e/kg	262 295,98	
					Trp (km)	500,00	0,02	CO2 kg/ton*km	53 112,00	von bahr 2016
					Spridning på åkermark	4 426,00	66,80	kg CO2 e/ton slam	295 656,80	Grundestam et al, 2020
Tot									979 214,53	
TOT CO2 e kg/år									3 620 079,72	

Teckenförklaring		
Q1	Inkommande Primärt slam	
Q2	slam mängd efter röttkammare	2% of Q1
Q3	slam mängd från slamlager	
Q4	Slam mängd från centriflug	
P	Pump	
Trp	transport	

Utsläppsberäkningar – pyrolysanläggning som hanterar enbart slam från Lindholmen ARV

SCENARIO 1

Slam	Q1 (m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Varde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process steg 1	49,74	18 155,10	3,01	546,47	P1	5 931,25	0,09	Co2 e Kg /Kwh	533,81
					CH4 (kg)	11 129,08	25	Kg CO2 e/kg	278 226,91
					N2O (kg)	667,28	298	CO2 e faktor	198 849,59
Tot									477 610,31
Slam	Q3 (m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Varde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process steg 2	130,28	47 552,20	2,06	979,58	Polymerer (kg)	10 823,00	18,00	CO2 kg /ton	194,81
					P4 (kWh)	9 198,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	827,82
					Centrifug (kWh)	132 860,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	11 957,40
					CH4 (kg)	19 591,51	25,00	Kg CO2 e/kg	489 787,66
					N2O (kg)	1 174,67	298,00	CO2 e faktor	350 052,68
Tot									852 820,37
Slam	Q4 (m³/d)	Q (m³/år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Varde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process steg 3		4 426,00	22,00	973,72	Biokol (ton)	381			
					Inlagring biokol - 90% C är kvar efter 100 år	181	3,67	CO2 = 3,67 °C	-664 270,00
					P5 (kWh)	12 775,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	1 149,75
					Överskottsvärme (KWh)	2 092 524,28	0,09	Co2 e Kg /Kwh	-188 327,19
					Trp och spridning biokol(km)	45,00	0,02	CO2 kg/ton*km	411,48
Tot									-851 035,96
TOT CO2 e kg/år									479 394,73
Minskad utsläpp CO2 e Kg/år									3 140 684,99

Utsläppsberäkningar – pyrolysanläggning som hanterar slam från Lindholmen, Kapellskär och Hallstavik ARV

SCENARIO 2

Slam	Q 1(m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process Steg 1	49,74	18 155,10	3,07	556,45	P1	5 931,25	0,09	Co2 e Kg /Kwh	533,81
					CH4 (kg)	11 129,08	25	Kg CO2 e/kg	278 226,91
					N2O (kg)	667,28	298	CO2 e faktor	198 849,59
Tot									477 610,31
Slam	Q 3(m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process Steg 2	130,28	47552,2	2,06	979,57532	Polymerer (kg)	10823	18	CO2 kg /ton	194,81
					P4 (KWh)	9198	0,09	Co2 e Kg /Kwh	827,82
					Centrifug (KWh)	132860	0,09	Co2 e Kg /Kwh	11 957,40
					CH4 (kg)	19591,5064	25	Kg CO2 e/kg	489 787,66
					N2O (kg)	1174,673418	298	Kg CO2 e/kg	350 052,68
Tot									852 820,37
Slam	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process Steg 3	Q4	4 426,00	22,00	973,72	P5 (KWh)	12 775,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	1 149,75
	Q Omblandningstank	6273	22	1380,06	CH4 (kg)	19 474,40	25	Kg CO2 e/kg	486 860,00
					N2O (kg)	1 167,65	298	Kg CO2 e/kg	347 960,27
					Trp (km)	70	0,02	CO2 kg/ton*km	2318,5008
Tot									838 288,52
Process Steg 4	Biokol (ton)	700,00			P6 (KWh)	12 775,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	1149,75
	C ton i biokol (ton)	350							-1 217 915,49
					Wasteheat (KWh)	2 965 748,94	0,09	Co2 e Kg /Kwh	-266 917,40
					Trp och spridning biokol(km)	45,00	0,02	CO2 kg/ton*km	756,00
Tot									-1 482 927,14
TOT CO2 e kg/år									685 792,06

Minskad utsläpp CO2 e Kg/år

2 934 287,66

Utsläppsberäkningar – biogasanläggning med gasmotor vid Lindholmen ARV

SCENARIO 3

Process steg	Q 1(m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
process Steg 1	49,74	18 155,10	3,07	556,45	P1	5 931,25	0,09	Co2 e Kg /Kwh	533,81
					P2 (cirkulation pump - rörtkammare) (kWh)	162 060,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	14 585,40
					El producerade KWh	1 400 000,00	0,09	Co2kgge/ KWh	-126 000,00
					Energgi KWh	751 596,51	0,353	Co2kgge/ KWh	-265 313,57
					Olja (medelvärde)	1	288,00	Co2 g/KWh	0,29
					CH4 (kg)	11 129,08	25	Kg CO2 e/kg	278 226,91
					N2O (kg)	667,28	298	Kg CO2 e/kg	198 849,59
Tot									100 882,43
Slam	Q2 (m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process Steg 2	0,00	0,00	0,00	190,00	P3 (kWh)	5 931,25	0,09	Co2 e Kg /Kwh	533,81
					CH4 (kg)	9 269,63	25	kg CO2 e/kg	231 740,77
					N2O (kg)	555,79	298	Kg CO2 e/kg	165 625,81
Tot									397 900,40
Slam	Q3 (m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process steg 3	130,28	47 552,20	2,61	1 238,73	Polymerer (kg)	10 823,00	18	CO2 kg /ton	194,81
					P4 (kWh)	9 198,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	827,82
					Centrifug (kWh)	132 860,00	0,09	Co2 e Kg /Kwh	11 957,40
					CH4 (kg)	24 774,70	25	Kg CO2 e/kg	619 367,41
					N2O (kg)	1 485,45	298	Kg CO2 e/kg	442 663,70
Tot									1 075 011,14
Slam	Q4 (m ³ /d)	Q (m ³ /år)	TS (%)	TS (ton/år)	Process	Värde	CO2 e Faktor	Faktors enhet	Utsläpp CO2e (kg /år)
Process steg 4		4 426,00	22	973,72	P5 (kWh)	2 625,26	0,09	Co2 e Kg /Kwh	236,27
					CH4 (kg)	19 474,40	25	Kg CO2 e/kg	486 860,00
					N2O (kg)	381,00	298	Kg CO2 e/kg	113 538,00
					Trp (km)	12 775,00	0,09	CO2 kg/ton*km	1 149,75
					Spridning på åkermark	4 426,00	66,80	kg CO2 e/ton slam	295 656,80
Tot									897 204,55
TOT CO2 e kg/år									2 470 998,52
Minskad utsläpp CO2 e Kg/år									1 149 081,20