Val av första fullskaliga pyrolysanläggning vid ett avloppsvattenreningsverk i Sverige

Selection of the first full-scale pyrolysis facility at a wastewater treatment plant in Sweden

Aleksandra Lazic, Utvecklingsingenjör på Roslagsvatten, Box 437, 184 26 Åkersberga, aleksandra.lazic@roslagsvatten.se

Sammanfattning

Denna studie beskriver beslutet, och utvärderingen inför beslutet att implementera pyrolysteknik för behandling av avloppsslam vid Margretelunds avloppsreningsverk i Åkersberga, Sverige. Analysen omfattar jämförelse av olika slambehandlingsmetoder med fokus på energieffektivitet, resursåtervinning, miljöpåverkan, ekonomiska aspekter och marknadspotential där framtida krav på kvaliteten hos avloppsvattenprodukter som används på åkermark samt på recirkulation av växtnäringsämnen utgör nyckelfaktorer. Resultaten visar att pyrolysprocessen erbjuder flera fördelar i form av minskad slamvolym, produktion av ett luktfritt och näringsrikt slambiokol där organiska föroreningar och smittämnen destrueras, bildning av kolsänka och minskade utsläpp av växthusgaser samt möjligheter till energi- och fosforåtervinning. Baserad på sina egenskaper och sitt näringsinnehåll kan slambiokol användas som gödsel- och jordförbättringsmedel. Begränsningar med tekniken inkluderar behovet av initial elenergi, begränsad erfarenhet av långvarig fullskalig drift i Sverige samt behovet av att etablera en marknad för slambiokol. Sammantaget erbjuder pyrolystekniken en framtidssäker lösning för hållbar slamhantering och resurseffektiv fosforåtervinning, vilket gör tekniken väl lämpad för implementering inom ramen för en cirkulär och hållbar avloppshantering.

Keywords: Avloppsslambehandling; Cirkulär kretsloppslösning; Fosforåtervinning; Kolsänka; Pyrolysteknik; Resursåtervinning; Slambiokol; Teknikutvärdering

Abstract

This study describes the decision and the evaluation prior to the decision to implement pyrolysis technology for sewage sludge treatment at the Margretelund wastewater treatment plant in Åkersberga, Sweden. The analysis includes a comparison of various sludge treatment methods focusing on energy efficiency, resource recovery, environmental impact, economic aspects and market potential where future requirements for the quality of wastewater-derived products used on agricultural land and for nutrient recirculation are key factors. The results show that the pyrolysis process offers several advantages including reduced sludge volume, production of odorless and nutrient-rich biochar in which organic contaminants and pathogens are destroyed, carbon sequestration, reduced

greenhouse gas emissions, and opportunities for energy and phosphorus recovery. Based on its properties and nutrient content, sludge biochar can be used as a fertilizer and soil amendment. Limitations of the technology include the need for initial electrical energy input, limited experience with long-term full-scale operation in Sweden, and the need to establish a market for sludge biochar. Overall, pyrolysis technology provides a future-proof solution for sustainable sludge management and resource-efficient phosphorus recovery, making it well suited for implementation within a circular and sustainable wastewater management framework.

Keywords: Circular wastewater management; Carbon sequestration; Phosphorus recovery; Pyrolysis technology; Resource recovery; Sludge-derived biochar; Sewage sludge treatment; Technology assessment

Inledning

Svenska avloppsreningsverk (ARV) står inför betydande utmaningar i samband med omställningen mot ett hållbart och cirkulärt samhälle. Slamhanteringen utgör en central aspekt, särskilt med avseende på fosforåtervinning som kan ersätta en del av mineralgödselbehovet inom lantbruket. Samtidigt medför ökade krav på lägre halter av föroreningar i slammet och skärpta reningskrav för avloppsvatten, som i vissa fall kan medföra att mer föroreningar hamnar i slammet, att direkt spridning av slam på åkermark blir alltmer utmanande. Hantering av restprodukter, lukt och utsläpp av växthusgaser är ytterligare faktorer som motiverar behovet av modifierade och innovativa slambehandlingsmetoder.

Under sommaren 2018 tillsatte den svenska regeringen en utredning om en giftfri och cirkulär återföring av fosfor från avloppsslam, vilken färdigställdes 2020 som ett förslag på nytt regelverk (Hållbar slamhantering, SOU 2020:3). Utredningen föreslog två alternativa scenarion:

- Scenario 1: Totalförbud mot all spridning av avloppsslam.
- Scenario 2: Förbud mot spridning av avloppsslam men med undantag för spridning av hygieniserat och kvalitetssäkrat slam på jordbruksmark.

För båda scenarierna gäller en införandeperiod på tolv år med krav på att minst 60 % av den fosfor som förekommer i avloppsslam från kommunala AVR med en storlek över 20 000 personekvivalenter (pe) ska återvinnas. Slamspridning på åkermark räknas i detta sammanhang som en godkänd form av fosforåtervinning. Vidare omfattar båda scenarierna ett förbud mot användning av avloppsslam för jordtillverkning och deponitäckning.

Med anledning av pågående utredningar om ett uppdaterat nationellt regelverk för slamhantering och med hänsyn till den osäkerhet som råder kring användningen av Revaq-certifierat slam på åkermark, har flera svenska VA-organisationer påbörjat utvärderingar av tekniska lösningar för uppgradering av befintliga eller etablering av nya slambehandlingsmetoder. Denna utveckling drivs samtidigt av ökade krav på cirkulära kretsloppslösningar och resurseffektiv återvinning av fosfor och andra växtnäringsämnen.

För Roslagsvatten, som planerar ett nytt ARV i Margretelund, har valet av slambehandlingsmetoden varit en central fråga med tanke på att reningsverket ska säkerställa högkvalitativ avloppsrening för Österåkers och Vaxholms kommuner under minst 30 år. Det nya reningsverket kommer att byggas i två etapper:

- Etapp 1 (klar 2028): Kapacitet för 57 000 pe och slambehandling av cirka 1 500 ton torrsubstans (TS) per år.
- Etapp 2 (klar 2031): Kapacitet för 93 000 pe och slambehandling av cirka 3 000 ton TS per år.

Som första steg i utredningen av lämplig slambehandlingsmetod för nya reningsverket i Margretelund, har Roslagsvatten tagit fram en slamstrategi och slamvision (Roslagsvatten, 2025). Slamvisionen definierar mål som den framtida slambehandlingsmetoden ska uppnå. Utan rangordning av målen ska den nya slambehandlingsmetoden:

- Säkerställa fortsatt Revaq-certifiering och återvinning av minst 60 % av fosforn i slammet; nyttiggöra växtnäring, mikronäringsämnen och mullbildande ämnen från slammet.
- Möjliggöra breda avsättningsmöjligheter för slam för att hantera framtida osäkerhet kring spridning av Revaq-certifierat slam.
- Minska transportbehovet för slam från reningsverket.

- Reducera växthusgasutsläpp från reningsverket och bidra till att Margretelund kan vara ett klimatneutralt reningsverk.
- Bidra till en bra miljö för boende i området med minimering av luktpåverkan från slambehandlingen.
- Bidra till energiåtervinning.
- Säkerställa automatiserad drift med redundansmöjligheter.
- Inte påverka avloppsvattenrening negativt.

Eftersom reningsverket i Margretelund byggs som en helt ny anläggning utan befintliga volymer som behöver utnyttjas, öppnas möjligheten att utvärdera innovativa och framtidsinriktade slambehandlingsmetoder och tekniker. Denna strategi möjliggör integration av avancerade lösningar som kan bidra till en hållbar, cirkulär och klimatneutral hantering av avloppsslam.

Teknikval för slambehandling

Metodik

För det nya verket har Roslagsvatten under 2020-2023 genomfört en omfattande analys och teknikutvärdering av olika tekniska lösningar för behandling och hygienisering av avloppsslam. Bara tekniker med teknikmognadsgrad (TRL) över 8 (definieras enligt EU:s Horizon 2020-program som att systemet är komplett och bekräftat) som dessutom bedömdes lämpade för Margretelunds slambelastning i etapp 2 valdes ut. Detta innebar att alternativet med monoförbränning och efterföljande fosforutvinning från aska valdes bort.

Fem teknikkedjor identifierades och utvärderades i mer detalj. Kedja 1 representerar nollalternativet, det vill säga dagens traditionella slambehandlingsmetod, mot vilken övriga teknikkedjor har jämförts:

1. Mesofil anaerob rötning + slamlagring i minst 6 månader för hygienisering
2. Termofil anaerob rötning
3. Mesofil anaerob rötning + Termisk hydrolys (THP)
4. Hydrotermisk karbonisering (HTC) utan rötning
5. Pyrolys process utan rötning

I samtliga teknikkedjor ingick rejektvattenrening, luftrening, slamlagring (vid reningsverket samt vid slamlager för nollalternativ) och en slamprodukt (slam, hydrokol eller slambiokol) av Revaq-kvalitet som kunde användas på åkermark.

Teknikkedjorna utvärderades med hjälp av 24 olika kriterier som klassificerades inom fyra kategorier: **tillgänglighet, ekonomi, resurshushållning** och **emissioner** (Tabell 1). Kriterierna har inte viktats mot varandra utan används som ett verktyg för få en överblick över olika för- och nackdelar med respektive slambehandlingsmetod. Utvärderingsteknikerna har ursprungligen utarbetats av Käppalaförbundet (Käppalaförbundet 2020) men har uppdaterats och anpassats till Roslagsvattens specifika förutsättningar.

Två termiska metoder, hydrotermisk karbonisering **(HTC)** och **pyrolys**, har utvärderats i detalj i nära dialog med respektive teknikleverantör.

HTC som också kallas för våtpyrolys behandlar avloppsslam i syrefri miljö vid ett tryck på 20-35 bar och en temperatur på 180-260 °C. Den resulterade blandningen av HTC-biokol (hydrokol) och processvatten, så kallad HTC-slurry, behöver sedan avvattnas mekanisk för att få slutprodukten hydrokol med en torrhalt över 60% torrsubstans (TS). Förutom hydrokol genererar HTC-processen även ett processvatten (HTC-vatten) som behandlas vidare i ett våtoxidationssteg. Det våtoxiderade HTC-vattnet kräver antingen separat rening eller återföring till inkommande avloppsvatten för fortsatt behandling.

I februari 2021 inleddes ett forskningsprojekt mellan IVL Svenska Miljöinstitutet, C-green (leverantör av HTC-tekniken OxyPower HTC™) och Roslagsvatten. Syfte med projektet var att utvärdera de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för implementering av OxyPower HTC™ som en hållbar metod för slamhantering vid det nya reningsverket i Margretelund. HTC-tekniken utvärderades genom pilotförsök.

Projektet fokuserade på tre huvudområden:

1. Undersökning av HTC-biokolets (hydrokol) egenskaper och dess potential att ersätta traditionellt slam som jordförbättringsmedel eller vid åkermarksanvändning.
2. Biologisk behandling av våtoxiderat HTC-vatten för att utvärdera om de organiska substanserna, kväve och eventuella toxiska föroreningar i HTC-vattnet kan hanteras vid avloppsreningsverk.
3. Systemanalys och processintegration, inklusive material- och energibalanser, för att bedöma om HTC-processen är ett resurseffektivt alternativ för slamhantering.

Tabell 1. Kriterier och deras tolkning som användes för utvärdering av fem teknikkedjor som potentiella slambehandlingsmetoder för framtida AVR i Margretelund

	Kriterier	Tolkning
Tillgänglighet	Efterfrågan på slam/biokol/restprodukt	Kommer det att finnas ett intresse för att ta emot slam/biokol med denna metod?
	Teknikmognad	Är tekniken välbeprövad?
	Påverkan på rejektvattenrening	Finns det ökat belastning på rejektvattenrening?
	Påverkan på rötkammarkapacitet	Finns det påverkan på rötkammarvolym
	Platsbehov	Hur mycket yta behövs? Allt inom detaljplan?
	Lagerbehov på plattan	Minskning av lagerbehov jfr med dagens
	Lagerbehov på verket	Minskning av lagerbehov jfr med dagens
	Arbetsmiljö	Påverkan på den fysiska arbetsmiljön på ARV
	Omgivningspåverkan & lukt	Finns det risk för klagomål? Lukt & buller påverkan
	Uppfyllande av slamdirektiv	P utvinning > 60% samt förmåga att uppfylla: Scenario 1.-totalförbud för slamspridning Scenario 2.-totalförbud för spridning med undantag för hygieniserad slam av hög kvalitet
	Driftsäkerhet	Redundans vid ev. stopp (hur snabbt får man reservdelar); risk för driftsstörningar; mer utrustning -ökat arbete med underhåll
Ekonomi	Capex	Investeringar (SEK totalt)
	Opex	Driftkostnader (SEK/år)
	LCC för 20 år	Totala kostnader (SEK/m^3 behandlat)
Resurshushållning	Nyttiggörande av växtnäring och mull, samt låga halter av föroreningar	P, N, K, mikronäringsämnen & mull, samt föroreningar
	Omvandling av högvärdig värmeenergi	Energi som åtgår för att driva processen /värma lokaler
	Elförbrukning	Elförbrukning per år
	Påverkan på biogasproduktion	
	Möjligheten till soldrift	Möjligheten att använda solenergi för att köra processen
	Transporter & omhändertagande	Hur många transporter förväntas per månad?
	Kemikalie-användning	Krävs tillsats av externa kemikalier för behandlingen och eller ökad polymerförbrukning för avvattning
Ekonomi	Utsläpp till vatten	Utsläpp av näringsämnen via rökgaskondensat, dränvatten, urlakning
	Utsläpp av föroreningar till luft	Metanavgång vid lagring på verket & långtidslagring? Lustgas? Utsläpp av metaller, dioxiner via rökgas?
	Utsläpp av CO2 till luft	CO2eq/ton TS
	Påverkan på mark	Tillförsel av mikroplaster, metaller, läkemedelsrester och organiska föroreningar till mark

Resultaten från projektet visade att HTC-tekniken kan hygienisera slammet och minska slamvolymen genom att öka TS-halten till ca 65 %. Trots att processen i princip är exoterm och en nettoproduktion av värmeenergi över hela processen kan observeras, så behöver processen högvärdig elenergi för drift. Därmed blir ett effektivt utnyttjande av överskottsvärmen som produceras avgörande för att åstadkomma högre resurseffektivitet. Analys av HTC-vatten visade att en ökad internbelastning förekom främst på grund av organiska föroreningar och ammonium, vilket kan kräva extra processvolymer. Inga föroreningar från slammet destruerades eller avlägsnades under HTC-behandlingen, vilket innebär att dessa kvarstår i hydrokolet. Dessutom finns nästan all fosfor och stora delar av kvävet i slammet också kvar och kan återföras via användning av hydrokolet (Baresel et al., 2021; 2023).

Pyrolys är en termisk metod där torkat slam hettas upp i syrefri miljö till höga temperaturer, mellan 450-900 °C. Den pyrolysteknik som utvärderades för Margretelund ARV kommer från det danska cleantech-företaget AquaGreen, som har utvecklat en unik integrerad ångtorknings- och pyrolysprocess. Processen består av två steg:

1) Torkning av avvattnat slam (ca 25% TS ingående) i 2h vid 200 °C
2) Pyrolys av torkat slam i 20 min vid 650 °C.

Båda stegen sker i en syrefri miljö och hela systemet är kompakt och slutet (se Figur 1) vilket eliminerar problem med lukt och damm. Den resulterande produkten, så kallat slambiokol, har 100 % TS och fungerar som kolsänka. Under pyrolysprocessen uppstår även pyrolysgaser. Pyrolysgaserna är energirika och kan förbrän¬nas i en gasbrännare vilket kan förse både pyrolysen och torken med värme. Det unika med AquaGreens pyrolysanläggning är att den är självförsörjande på energi när processen går. Dessutom kan den överskottsvärme som uppstår nyttjas för uppvärmning av avloppsreningsverket och kontorslokaler. Alla rökgaser renas i skrubber innan de släpps ut genom skorstenen.

Pyrolysenhet som utvärderades för Margretelund ARV heter HECLA® Setores 1 500 och behandlar ca 1 500 ton TS per år. Hela pyrolysanläggningen tillsammans med slamavvattnarna och slamsilos placeras inomhus.

Figur 1. Bild på AquaGreen HECLA® Setores 1.000 från Fårevejle avloppsvattenreningsverk i Danmark (ref: https://aquagreen.dk/technology/)

Resultat och diskussion

Resultat av teknikutvärderingen för Margretelund ARV med slamkapaciteten som motsvarar 3000 ton TS/år eller 93 000 pe (etapp 2) redovisas i Tabell 2. Betyg mellan 0 och 2 tilldelades för samtliga kriterier där ett högre värde motsvarar bättre resultat. Tabellen visar genomsnittliga betyg per kategori.

Resultaten visar att pyrolystekniken erhöll högst betyg av samtliga teknikkedjor inom nästan alla utvärderade kategorier. Inom kategorin **Tillgänglighe**t identifieras flera avgörande faktorer. Kedja 5 (pyrolys) är den enda slamhygieniseringsmetod som uppfyller kraven i både Scenario 1 och Scenario 2 enligt den föreslagna lagstiftningen. Metoden producerar en luktfri produkt av högsta kvalitet och minskar samtidigt lagringsbehovet vid ARV mest, genom en avsevärt reducerad slamvolym.

Erfarenheter från danska fullskaliga pyrolysanläggningar samt tidigare studier bekräftar att slambiokol är en luktfri, klimatmässigt fördelaktig och högkvalitativ produkt (Thomsen et al., 2018). Den höga processtemperaturen vid pyrolys leder till termisk destruktion av ett flertal oönskade ämnen, inklusive organiska föroreningar såsom PFAS, läkemedelsrester och polycykliska aromatiska kolväten (PAH), samt mikroplaster, virus och bakterier som finns i slammet. Vissa tungmetaller, exempelvis kadmium, kvicksilver och bly, avdunstar under processen, vilket ytterligare förbättrar den miljömässiga kvaliteten hos slambiokolet (Myrbeck och Lundin, 2019; Jordbruksverket, 2023; Palmborg et al., 2023). Slambiokol är dessutom en näringsrik produkt som innehåller bland annat fosfor, kalium och magnesium samt en viss andel kol och kväve. Detta ökar produktens acceptans och möjliggör användning både som jordförbättringsmedel och som

gödningsmedel för tillförsel av fosfor (Jordbruksverket, 2023; Palmborg et al., 2023).

Vid användning som jordförbättringsmedel ökar slambiokol jordens vattenhållande kapacitet, vilket ger skydd mot både torka och översvämningar (Myrbeck och Lundin, 2019). Dessutom förbättrar slambiokol jordens bördighet (Tomczyk et al., 2020) och främjar mikrobiell mångfald (Ahmad et al., 2022). Pyrolysprocessen bidrar till att smittämnen, organiska föroreningar samt en betydande andel av slammets kadmium elimineras, vilket minskar toxiciteten och riskerna vid användning av produkten som jordförbättring (Jordbruksverket, 2023).

Slambiokol kan även användas som filtermaterial för rening av avloppsvatten från läkemedelsrester och PFAS, samt för dagvattenrening och jordsanering (Palmborg et al., 2023; Krahn et al., 2022). Ytterligare potentiella användningsområden finns inom betong- och byggindustrin (Paulsson M., 2023), samt som torversättning, vilket kan bidra till minskade växthusgasutsläpp. Slambiokolet kan certifieras enligt både Revaq och EBC[2] (European Biochar Certificate), vilket säkerställer kvalitet och trygghet vid spridning i jordbruket samt underlättar etableringen av potentiella marknader.

Pyrolysprocessen möjliggör dessutom att de krav som ställs i det föreslagna avloppsslamdirektivet kan uppfyllas, även om Scenario 2 med ett totalförbud mot slamspridning skulle träda i kraft. Avloppsslam från Margretelund ARV är redan Revaq-certifierat och därmed av hög kvalitet för spridning på åkermark, men pyrolysbehandling säkerställer en ytterligare kvalitetsförbättring.

Tabell 2. Resultat av utvärderingen av fem teknikkedjor som slambehandlingsmetod för framtida Margretelund (med kapaciteten för etapp 2), som genomsnitt per kategori.

Kriterier	Mesofil rötning	Termofil rötning	Mesofil rötning + THP	HTC	Pyrolys
Tillgänglighet	1,1	1,0	1,2	0,9	**1,4**
Ekonomi	1,0	1,0	0,8	0,0	**1,0**
Resurshushållning	1,3	1,2	**1,4**	0,6	**1,4**
Emissioner	0,8	0,8	0,9	1,8	**2,0**
Elförbrukning	2	**1,8**	**1,8**	0	1,5
Resultat	**1,1**	**1,0**	**1,2**	**0,8**	**1,5**

Kedja 5 har ingen rötkammare före pyrolysen eftersom det ur ett energitekniskt perspektiv är mer fördelaktigt att torka och pyrolysera orötat, avvattnat slam än att först röta slammet och därefter torka och pyrolysera det (beräknat för Margretelundsslam). Detta beror på att orötat slam har ett högre energiinnehåll, vilket möjliggör större produktion av överskottsvärme och därmed en förbättrad energibalans i anläggningen jämfört med rötat slam. Vidare innebär avsaknaden av rötkammare att rejektvattnet som genereras vid slamavvattning innehåller lägre kvävehalter, vilket förväntas minska den interna kvävebelastningen på reningsverket med cirka 20 %. En sådan reduktion medför att de biologiska reningsvolymerna kan minskas med omkring 10 % i etapp 2, vilket frigör kapacitet som kan nyttjas i framtida utbyggnadsetapper.

Samtliga hygieniseringsmetoder bidrar till ett minskat lagringsbehov eftersom slammet inte längre behöver lagras i minst sex månader för hygienisering innan spridning på åkermark vilket är ett krav för mesofilt rötat slam enligt Revaq. Pyrolysprocessen minskar dock lagringsbehovet vid ARV mest genom en avsevärt reducerad slamvolym. Enligt leverantören av pyrolystekniken motsvarar den producerade mängden slambiokol endast cirka 10 % av den ursprungliga mängden behandlat slam, vilket innebär en betydande volymreduktion jämfört med traditionell slambehandling.

Trots att investeringskostnaderna för termiska behandlingsmetoder generellt är högre än för konventionella slambehandlingsprocesser baserade på anaerob rötning, visar den ekonomiska analysen att det är främst driftkostnaderna som har störst inverkan på nuvärdesanalysen, livscykelkostnadsanalysen (LCC) och den **ekonomiska kategorin** som helhet. Slamvolymreduktion leder till en minskning av transportbehovet med cirka 90 %, vilket inte bara medför klimatmässiga fördelar genom minskade koldioxidutsläpp, utan även leder till betydande besparingar i form av reducerade drift- och kvittblivningskostnader. Baserat på nuvarande kvittblivningskostnader och den förväntade slamproduktionen under etapp 2 uppskat-

[2] *Den europeiska certifieringen för biokol, European Biochar Certificate, ställer krav på såväl produktionsprocess som utgående produkter (EBC, 2023).*

tas de årliga besparingarna till cirka 12 miljoner kronor enbart till följd av minskade transportkostnader. Om dessutom potentiella intäkter från försäljning av slambiokol samt handel med utsläppsrätter inkluderas, beräknas den totala årliga driftkostnadsbesparingen uppgå till omkring 15 miljoner kronor jämfört med rötningsalternativet. Denna uppskattning inkluderar samtliga merkostnader relaterade till drift av pyrolysanläggningen.

Användning av pyrolysprocessen och slambiokolet bidrar till elva av 17 FN:s Globala mål för hållbar utveckling (Paulsson M., 2023) som påverkar båda kategorier **Emissioner och Resurshushållning.** Då den höga temperaturen oskadliggör smittämnen är biokolet steriliserat och kan nyttjas till exempelvis jordförbättrande ändamål utan föregående lagring i ett halvår, vilket innebär att pyrolysbehandlingen besparar det metan- och lustgasutsläpp som annars skulle uppstå i en traditionell slamhantering. Pyrolysprocessen vid Margretelund kan minska utsläppen av växthusgaser eller CO_2-avtrycket med ca 6 640 ton CO_2-ekvivalenter per år (beräknat för 93 000 pe) genom att eliminera behovet av lagring av slambiokol på slamplatta. Detta innebär att det inte sker några utsläpp av växthusgaser som metan och lustgas från slamplattor eller från åkermark när slambiokol sprids (Thomsen et al., 2018). När slambiokol plöjs ned i marken binds kolet under mycket lång tid (tusentals år), vilket skapar en kolsänka (Palmborg et al., 2023). Reningsverket med pyrolysteknik blir därför klimatsmart. Enligt European Biochar Industries (EBI) har biokol från avloppsslam ett negativt CO_2-avtryck, med en global uppvärmningspotential (GWP) på -4,0 kg CO_2-ekv / kg P_2O_5, vilket är lägre än för andra fosforåtervinningsprocesser (Palmborg et al., 2023).

Fosfor i slambiokolet förekommer i både lättillgängliga och mer långsamverkande (förrådsfosfor) former, som båda är av intresse för lantbruket (Bertilsson et al., 2005; af Petersens och Strand, 2022; Lundin et al., 2021). Den lättillgängliga fosforn kan tas upp direkt av växter och ersätta mineralgödsel, medan den långsamverkande delen successivt frigörs beroende på många olika faktorer som jordens pH, mikroliv, jordart mm (Jordbruksverket, 2023; Bertilsson et al., 2005). Att fosfor i slambiokolet finns i de två olika formerna gör att växter hinner ta upp fosfor innan den läcker ut till grundvatten vilket ger miljömässiga fördelar. Det bidrar också till att höja markens fosforklass vilket på sikt kommer att minska behov av mineralgödsel. Hur mycket av fosforn som kommer att finnas i lättillgängliga eller långsamverkande former beror på hur hög pyrolystemperaturen är; lägre temperaturer bidrar till högre andel av lättillgänglig fosfor (Zhang et al., 2024). Forskarna och teknikleverantörer har identifierat en sweet spot för pyrolystemperatur på 550-700 °C där samtliga organiska mikroföroreningar (läkemedelsrester, mikroplast, PFAS) elimineras samtidigt som fosfor bibehålls i sin lättillgängligform (Gerber, 2024; 2nd Swedish conference on sewage sludge biochar, 2024; Vali, 2024).

Ett av de kriterier som påverkas negativt vid tillämpning av pyrolysteknik jämfört med traditionell slambehandlingsmetod är **elförbrukningen**. Pyrolysprocessen är i grunden energieffektiv, då den utöver biokol även genererar energirika pyrolysgaser som kan förbrännas för att tillgodose värmebehovet i både torknings- och pyrolyssteget. Processen kräver emellertid en viss mängd elenergi för uppstart vilket innebär att en kontinuerlig och stabil drift med minimalt antal start- och stoppsekvenser är att föredra. Om avloppsslammet har ett tillräckligt högt energiinnehåll, till exempel inte har genomgått rötning, kan torkningen av slammet helt försörjas med den värme som alstras i pyrolysprocessen. Den överskottsvärme som därmed genereras kan utnyttjas för uppvärmning av lokaler inom reningsverket, vilket potentiellt möjliggör en värmemässig självförsörjning av anläggningen. I Roslagsvattens fall beräknas den valda pyrolysprocessen generera minst tre gånger mer överskottsenergi än den elenergi som förbrukas. För att ytterligare reducera elanvändningen och öka den totala energiutvinningen vid ARV kan installation av solpaneler övervägas, vilket skulle kunna bidra till en mer resurseffektiv och hållbar energibalans i anläggningens drift.

Diskussion och beslut

Resultaten från den genomförda teknikutvärderingen av olika behandlingsmetoder för avloppsslam visar att pyrolysprocessen i högst grad uppfyller de mål och kriterier som fastställts i Roslagsvattens slamstrategi och slamvision. Pyrolystekniken erbjuder en integrerad lösning där hygienisering, lukt- och volymreduktion,

kvalitetsförbättring och återvinning av näringsämnen kombineras på ett sätt som inte är möjligt med konventionella rötningsbaserade behandlingsmetoder.

En identifierad utmaning är att det i nuläget saknas dokumenterad erfarenhet av långvarig drift av pyrolysteknik vid svenska ARV. En implementering vid Margretelunds ARV skulle därför innebära att Roslagsvatten blir den första aktören i Sverige att tillämpa pyrolys för behandling av avloppsslam i fullskala. Den valda leverantören av pyrolysteknik erbjuder dock en helhetslösning som inkluderar både tork- och pyrolysanläggning, vilket förväntas underlätta driften. Liknande system är redan i drift i fullskala i Danmark, vilket minskar den tekniska osäkerheten.

Ytterligare en osäkerhetsfaktor är avsaknaden av en etablerad marknad för slambiokol i Sverige. Detta innebär att Roslagsvatten initialt kommer att behöva bidra till att utveckla och etablera marknaden innan en stabil ekonomisk avkastning kan förväntas.

För att minska de finansiella riskerna har Roslagsvatten ansökt om, och beviljats, ekonomiskt stöd från Klimatklivet (Naturvårdsverket) och från Europeiska unionen genom NextGenerationEU (beslut 26 januari 2023). I samband med detta beviljade stöd fattade Roslagsvatten beslut om att implementera pyrolysteknik vid Margretelunds ARV för behandling av avloppsslam och produktion av slambiokol (Nyheter, 2024a; Nyheter, 2024b). Enligt bidragsvillkoren krävs att pyrolysanläggningen tas i drift redan under 2026, trots att det nya reningsverket planeras vara färdigställt först 2028. Detta betyder att biokol kommer att produceras med slam från existerande reningsverk mellan 2026 och 2028. Detta krav är kopplat till villkoren för det beviljade investeringsstödet, som omfattar ett bidrag motsvarande 40 procent av den totala investeringskostnaden för pyrolysanläggningen.

Slutsatser

Den genomförda tekniska och ekonomiska utvärderingen av alternativa behandlingsmetoder för avloppsslam har visat att pyrolystekniken uppfyller Roslagsvattens mål och kriterier för hållbar, resurseffektiv och miljösäker slamhantering där framtida krav på kvaliteten hos avloppsvattenprodukter som används på åkermark samt på recirkulation av växtnäringsämnen utgör nyckelfaktorer. Tekniken kombinerar hygienisering, volym- och luktreduktion, kvalitetsförbättring och återvinning av näringsämnen på ett sätt som inte kan uppnås med konventionell rötningsbaserad slambehandling. Mot bakgrund av dessa resultat och i samband med Klimatkliv-bidrag har Roslagsvatten beslutat att implementera pyrolysprocessen som huvudmetod för slambehandling vid Margretelunds avloppsreningsverk (ARV).

Pyrolys är en termisk process där organiskt material bryts ned under syrefria förhållanden. Processen genererar ett stabilt, luktfritt och näringsrikt material av hög kvalitet, så kallat slambiokol. Den höga temperaturen vid pyrolys destruerar organiska föroreningar och smittämnen samt får vissa tungmetaller att avdunsta, vilket minskar toxicitet och säkerställer en trygg användning av produkten. Slambiokolet kan användas som jordförbättrings- och gödningsmedel i växtbäddar, jordbruksmark och annan grön infrastruktur. Genom dess användning återförs växtnäringsämnen och biogent kol till marken, vilket bidrar till långsiktig kolinlagring, förbättrad jordstruktur och ökad bördighet.

Pyrolysprocessen minskar utsläpp av växthusgaser från ARV genom eliminering av metan- och lustgasbildning vid lagring och spridning av slam. Processen kan dessutom generera överskottsvärme som kan nyttjas för uppvärmning av lokaler inom reningsverket, vilket ökar energieffektiviteten och bidrar till lokal energiförsörjning.

Trots att investeringskostnaderna för pyrolystekniken är högre än för den konventionella slambehandlingsmetoden visar livscykel- och kostnadsanalyser att metoden kan ge betydande ekonomiska fördelar över tid. Dessa fördelar är främst kopplade till minskade kvittblivnings- och transportkostnader samt möjligheten till sekundära intäkter genom försäljning av slambiokol, energiåtervinning och handel med klimatrelaterade utsläppsrätter. Helhetslösningen med integrerad tork- och pyrolysanläggning förenklar driften och minskar tekniska risker.

Införandet av pyrolystekniken vid Margretelunds ARV innebär att Roslagsvatten blir den första aktören i Sverige att använda pyrolys i fullskala för avloppsslam. Initialt krävs insatser för att etablera en marknad för slambiokol, men produktens kvalitet och potential för certifiering (Revaq och EBC) skapar goda förutsätt-

ningar för kommersiell etablering.

Sammantaget representerar pyrolystekniken en robust och framtidssäker lösning som kombinerar ekologiska, ekonomiska och sociala hållbarhetsaspekter. Tekniken stödjer cirkulära kretslopp genom fullständig fosforåtervinning och bidrar till klimatneutral slamhantering. Roslagsvattens pyrolysanläggning kan fungera som ett referensfall för framtida implementeringar inom den kommunala VA-sektorn och representerar ett viktigt steg mot resurseffektiv, hållbar och klimatanpassad avloppshantering i Sverige.

Referenser

2nd Swedish conference on sewage sludge biochar (2024) https://swedenwaterresearch.se/bolagsnyheter/dar-satt-den-andra-svenska-slambiokolskonferensen-genomford/ (Hämtad 2025-11-06)

af Petersens E. och Strand L. (2022) Återföring av näring från källsorterade avlopp- nuläggesstudie. MACRO 3 www.macrosystem.se

Ahmad A., Chowdhary P., Khan N., Chaurasia D., Varjani S., Pandey A. och Chaturvedi P. (2022). Effect of sewage sludge biochar on the soil nutrient, microbial abundance, and plant biomass: A sustainable approach towards mitigation of solid waste: Chemosphere. Volume 287, Part 1

Baresel C., Axegård P., Lazic A., Bornold N., Yang J-J. och Malovanyy A. (2023) Framtidens slamhantering vid Roslags vatten - Behandling av kommunalt orötat slam med HTC-teknik (OxyPower HTC™) och rening av HTC-vatten med SBR och MBBR. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport Nr B 2460.

Baresel C., Lazic A., Axegård P. och Yang J-J. (2021) Framtidens slamhantering vid Roslagsvattens reningsverk i Margretelund, Beskrivning av nuläget för slambehandling. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport Nr B 2430.

Bertilsson G., Rosenqvist H. och Mattsson L. (2005) Fosforgödsling och odlingsekonomi med perspektiv på miljömål. Naturvårdsverket, Rapport 5518.

EBC (2023). European Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Switzerland: Carbon Standards International (CSI).

Gerber H. (2024) Sewage sludge biochar in the scope of the EU Fertilizing Product Regulation, EBI. 2nd Swedish Conference on Sewage Sludge Biochar, Malmö, Sweden

Hållbar slamhantering, SOU 2020:3

Horizon 2020 program: https://horizoneuropencpportal.eu/store/trl-assessment (Hämtad 2025-11-06)

Jordbruksverket, 2023. Gödselmedelsproduktion i Sverige, Aktuella initiativ, tekniker och förutsättningar. Jordbruksverket, Rapport 2023:09

Käppalaförbundet 2020. Käppalaförbundets slamstrategi. Dnr KF2020-129

Krahn K.M., Cornelisen G., Castro G., Arp H.P.H., Asimakopoulos A.G., Wolf R., Holmstad R., Zimmerman A.R. och Sørmo E. (2022). Sewage sludge biochars as effective PFAS-sorbents. Journal of Hazardous Materials, 445.

Lundin E., Metson G.S., McConville A. och Westling K. (2021) Recirkulering av näringsämnen mellan stad och land - vad vill gödselanvändaren ha? IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport Nr B 2414.

Myrbeck Å. och Lundin E. (2019) Användning av recirkulerade fosforprodukter från avlopp –gödslingseffekt och upplägg av odlingstester. RISE Rapport 2019:83

Nyheter (2024a) VA-kluster Mälardalen: https://www.va-malardalen.se/va-kluster-malardalen/nyheter/nyhetsarkiv/2024-01-29-roslagsvatten-bygger-sveriges-forsta-reningsverk-med-pyrolys (Hämtad 2025-11-06)

Nyheter (2024b) Testbädd Ellinge hemsida: Roslagsvatten satsar på pyrolys - Sweden Water Research (Hämtad 2025-11-06)

Palmborg C., Norberg I., Saarela J. och Wakelin R. (2023). Förstudie -pyrolys av slam till biokol. Interreg Aurora projekt: Cross-border collaboration to improve the biogas circular economy

Paulsson M. (2023) Rest till Bäst- Biokol som lösning och produkt i det cirkulära och klimatpositiva samhället. Slutrapport -steg 3. https://biokol.org/publikationer/pdf/sammanfattande-slutrapport-steg-3 (Hämtad 2025-11-06)

Revaq (2025). Regler för certifieringssystemet utgåva 10.0: Svenskt vatten.

Roslagsvatten (2025). Slamvisionen för Margretelund avloppsreningsverk. Framsteg i Slambehandling | Nytt reningsverk i Margretelund (Hämtad 2025-11-06)

Thomsen T. P. (2018). Drying and pyrolysis of sludge - in a climate perspective. AquaGreen PCP phase 2, WP5: Carbon Footprint Analysis of AquaGreen system. DTU Chemical Engineering, Risø Campus.

Tomczyk A., Sokołowska Z. och Boguta P. (2020). Biochar physicochemical proper¬ties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, Volume 19, pages 191–215

Vali N. (2024) Engineering biochar from municipal sewage sludge: an experimental and theoretical study. University of Borås, PhD Thesis. http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hb:diva-30374

Zhang R., Liu H., Sariola-Leikas E., Khang-Quang T. och He C. (2024). Practical strategies of phosphorus reclamation from sewage sludge after different thermal processing: Insights into phosphorus transformation. Water Research 255