Svenskt Vatten
UTVECKLING

Rapport
Nr 2025-7

Slambiokol – marknadspotential, kolkrediter och affärsmodell

Förstudie för svenska VA-organisationer

Mattias Gustafsson
Lotta Ek
Jacqueline Hellmann
Anders Henriksson
Aleksandra Lazic

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma
BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma
TELEFON 08-506 002 00
E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Bibliografiska uppgifter
Nr 2025-7

RAPPORTENS TITEL	Slambiokol – marknadspotential, kolkrediter och affärsmodell. Förstudie för svenska VA-organisationer
TITLE OF THE REPORT	Sludge Biochar – Market Potential, Carbon Credits and Business Model. Feasibility Study for Swedish Water and Wastewater Organisations
FÖRFATTARE	Mattias Gustafsson, Lotta Ek och Jacqueline Hellmann, EcoTopic AB, Anders Henriksson och Aleksandra Lazic, Roslagsvatten AB
RAPPORTNUMMER	2025-7
ANTAL SIDOR	107
SAMMANDRAG	Pyrolys av avloppsslam framstår som en lovande metod för att hygienisera avloppsslam, recirkulera fosfor, hantera föroreningar och minska klimatpåverkan. Sveriges första fullskaleanläggning för pyrolys av avloppsslam kommer att starta under år 2026 på Roslagsvattens reningsverk i Margretelund. Med Roslagsvatten som utgångspunkt utforskar rapporten för- och nackdelar med slambiokol och dess marknadspotential, samt föreslår en affärsmodell för svenska VA-organisationer som tar hänsyn till dagens förutsättningar med framtiden i åtanke.
SUMMARY	Pyrolysis of sewage sludge is emerging as a promising method to hygienise sewage sludge, recycle phosphorus, manage contaminants and reduce climate impact. Sweden's first full-scale sewage sludge pyrolysis plant will start up in 2026 at Roslagsvatten's treatment plant in Margretelund. Using Roslagsvatten as a starting point, the report explores the pros and cons of sludge biochar and its market potential, and proposes a business model for Swedish water and wastewater organisations that take into account today's conditions with the future in mind.
SÖKORD	Avloppsslam, slambiokol, slamkol, pyrolys, slampyrolys, fosforåtervinning, kolsänka, kolkredit, BCR-kredit, hållbar slamhantering, marknad, ekonomi, nuvärdesanalys, affärsmodell, värde, värdekedja
KEYWORDS	Sewage sludge, sludge biochar, sludge carbon, pyrolysis, sludge pyrolysis, phosphorus recovery, carbon sink, carbon credit, BCR credit, sustainable sludge management, market, economics, present value analysis, business model, value, value chain
MÅLGRUPPER	Svenska VA-organisationer, potentiella användare av slambiokol, intresseorganisationer inom lantbrukssektorn, myndigheter, kommuner, regioner, beslutsfattare inom offentlig förvaltning
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGSÅR	2025
UTGIVARE	© Svenskt Vatten AB
REFERENS	Gustafsson M., Ek L., Hellmann J., Henriksson A. och Lazic A. (2025). *Slambiokol – marknadspotential, kolkrediter och affärsmodell. Förstudie för svenska VA-organisationer.* SVU-rapport 2025-7. Stockholm: Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	24–111
PROJEKTETS NAMN	Affärsmodell för slambiokol på parallella marknader
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling, Roslagsvatten AB, EcoTopic AB

Förord

Hållbar hantering av avloppsslam är en central fråga för VA-branschen. Utredningen Hållbar slamhantering (SOU 2020:3) understryker behovet av en giftfri och cirkulär återföring av fosfor vilket bidragit till intresset att utforska pyrolys av avloppsslam. Detta projekt initierades av Roslagsvatten som ett resultat av beslutet att etablera Sveriges första fullskaliga avloppsreningsverk med pyrolys i Margretelund. På grund av osäkerheter kring avsättning för slambiokol såg Roslagsvatten behovet av att inleda arbetet med att skapa grunden för en framtida marknad för slambiokol.

Denna rapport är en förstudie med syfte att identifiera möjligheter och utmaningar kopplade till marknadsutvecklingen för slambiokol. Den är resultatet av litteraturstudier, intervjuer, projektgruppsmöten och erfarenheter från såväl den svenska VA-branschen som den globala biokolbranschen. Projektgruppen har inkluderat representanter med nyckelroller inom hantering av avloppsslam för att bredda perspektivet. Under arbetet har vi fördjupat oss i kritiska frågor såsom skillnaden mellan växtbaserat biokol och slambiokol, växttillgängligheten av fosfor i slambiokol och pyrolysens värdeskapande i VA-organisationens affärsmodell. Vi har försökt lyfta olika perspektiv och möjligheter med tanke på att marknaden för slambiokol ännu inte existerar genom att dra paralleller till framför allt avloppsslam och växtbaserat biokol. Vår ansats har också varit att genomgående lyfta osäkerheter kring forskning och marknad och specifikt peka ut när vi bedömer att det finns kunskapsluckor.

Vår förhoppning är att rapporten ska fungera som ett stöd för VA-organisationer som överväger pyrolys. Däremot ingår inte jämförelse av olika slamhanteringsmetoder som en del i utredningen eftersom den tar avstamp i Roslagsvattens investeringsbeslut. Målgruppen omfattar både VA-branschen och beslutsfattare som verkar för en hållbar samhällsutveckling, samt aktörer inom jordbruk och klimatkompensation.

Huvuddelen av rapporten har skrivits av medarbetare från EcoTopic, i dialog med Roslagsvatten och representanter från projektgruppen. Innehållet som rör nuvärdesanalys och affärsmodell har skrivits av Roslagsvatten, vilket ger läsaren inblick i de förutsättningar som legat till grund för Roslagsvattens beslut att investera i pyrolys. Vi vill rikta ett varmt tack till alla som medverkat, särskilt projektgruppen, expertgruppen, referensgruppen och intervjuade aktörer som bidragit med ovärderlig kunskap och insikter. Vi vill också tacka Svenskt Vatten Utveckling för finansiering och stöd under projektets gång.

Stockholm 2025-04-29
Författarna

Innehåll

Förord ... 2
Sammanfattning ... 4
Summary ... 5
Begrepp och förkortningar ... 6

1 Bakgrund och introduktion ... 8
1.1 Marknadens mognad och begreppsförtydliganden ... 8
1.2 Metod och projektgrupp ... 8
2 Syfte och mål ... 10
2.1 Frågeställningar ... 10
2.2 Avgränsningar ... 10
2.3 Läsanvisningar ... 10
3 Att pyrolysera avloppsslam ... 12
3.1 Slambiokolets egenskaper och variation ... 13
4 Regelverk och certifieringar ... 22
4.1 Avloppsslam som ingångsmaterial ... 22
4.2 Pyrolys av avloppsslam ... 23
4.3 Slambiokol ... 24
4.4 Användning av slambiokol ... 27
4.5 Frivilliga certifieringar ... 30
4.6 BCR-krediter ... 31
5 Marknad för slambiokol ... 34
5.1 Användningsområden ... 34
5.2 Attityder och förväntningar ... 42
5.3 Dagens ekonomiska förutsättningar för slambiokol ... 45
6 Marknad för BCR-krediter ... 48
6.1 Benämning ... 48
6.2 När uppstår kolsänkan från slambiokol? ... 49
6.3 Aktörer, samverkan och roller ... 49
6.4 Beräkna storlek på BCR-kredit ... 52
6.5 Prisläge och prispåverkande faktorer ... 53
7 Additionalitet relaterat till BCR-krediter ... 56
7.1 Begreppet ... 56
7.2 Inverkan och risker ... 56
8 Certifiering av minskade utsläpp av metan och lustgas ... 59
8.1 Minskade utsläpp vid slampyrolys ... 59
8.2 Kan utsläpp av metan och lustgas inkluderas i BCR-kredit? ... 60
9 Bör svenska VA-organisationer pyrolysera avloppsslam? ... 62
9.1 Slampyrolys ur ett miljöperspektiv ... 62
9.2 Är slampyrolys motiverat ur ett klimatperspektiv? ... 63
9.3 Är slampyrolys motiverat ur ett ekonomiskt perspektiv? ... 63
9.4 Nuvärdesanalys ... 65
10 Värdekedja kring pyrolys av slam ... 70
11 Affärsmodell för VA-organisationer kring slambiokol ... 71
11.1 Generell Business Model Canvas ... 71
11.2 SWOT-analys av affärsmodell ... 75
12 Slutsatser ... 78

Referenser ... 82
Bilaga A Jämförelse mellan slambiokol och befintliga alternativ ... 94
Bilaga B Genomförande av intervjuer ... 106

Sammanfattning

Pyrolys av avloppsslam framstår som en lovande metod för att hygienisera avloppsslam, recirkulera fosfor, hantera föroreningar och minska klimatpåverkan. Sveriges första fullskaleanläggning för pyrolys av avloppsslam kommer att starta under år 2026 på Roslagsvattens reningsverk i Margretelund. Med Roslagsvatten som utgångspunkt utforskar rapporten för- och nackdelar med slambiokol och dess marknadspotential, samt föreslår en affärsmodell för svenska VA-organisationer som tar hänsyn till dagens förutsättningar med framtiden i åtanke.

Projektet har undersökt hur slambiokol kan bidra till en hållbar slamhantering och vilka faktorer som påverkar dess marknadspotential. Nuvarande forskningsläge visar att pyrolys är en metod för att hygienisera avloppsslam och hantera föroreningar som PFAS, mikroplaster och läkemedelsrester, samtidigt som en del av fosforn i slammet kan recirkuleras via slambiokolet. Det här motiverar pyrolys av avloppsslam ur ett miljöperspektiv. Pyrolysprocessen stabiliserar en del av kolet till den grad att det kan räknas som en kolsänka, vilket tillsammans med minskade växthusgasutsläpp från lagring av avloppsslam gör att pyrolys är välmotiverat även ur ett klimatperspektiv. Fosforn som huvudsakligen stannar kvar i slambiokolet kan återföras till jordbruket, men dess växttillgänglighet varierar och behöver utvärderas närmare.

Projektet genomfördes med hjälp av litteraturstudier, intervjuer med nyckelaktörer och insamling av erfarenheter från den globala biokolsbranschen. Det finns ett växande intresse för pyrolys av avloppsslam inom VA-branschen, men kunskapsluckor kring slambiokolets långsiktiga egenskaper kvarstår. Rapporten belyser särskilt behovet av att studera växttillgängligheten för fosfor och kväve och immobilisering av tungmetaller över tid, samt säkerställa att slambiokolets innehåll uppfyller regelverkens gränsvärden. Praktiska försök och gårdsstudier är avgörande för att säkerställa materialets användbarhet och acceptans, särskilt inom lantbruket där potentialen att använda slambiokol som gödselmedel bedöms vara störst och ligga närmast i tid.

Marknaden för slambiokol är i sin linda, och rapporten understryker vikten av att bygga lokala nätverk och skapa förtroende hos potentiella användare. Det finns en positiv inställning från lantbrukssektorn, men betalningsvilja för slambiokol är kopplad till att säljaren kan garantera materialets kvalitet och egenskaper. Kommunala VA-organisationer bör dra nytta av samarbete inom branschen för att dela kunskap och ta sig an gemensamma utmaningar.

Med utgångspunkt i Roslagsvattens förutsättningar visar rapporten att pyrolys av avloppsslam kan vara ekonomiskt motiverat, framför allt genom potential till minskade kvittblivningskostnader för slammet. Samma slutsats gäller inte nödvändigtvis VA-organisationer med lägre kvittblivningskostnad än Roslagsvatten. Intäkter från handel med kolkrediter är en möjlighet, men för att säkerställa ekonomisk bärkraft krävs anpassade affärsmodeller som utvecklas i takt med ökad kunskap, förändrade regelverk och marknadens utveckling.

Rapporten presenterar en förstudie för svenska VA-organisationer. Den betonar att pyrolys kan spela en central roll för framtidens hållbara slamhantering och uppmanar till fortsatta satsningar på forskning, praktiska försök och branschöverskridande samarbeten.

Summary

Pyrolysis of sewage sludge is emerging as a promising method to hygienise sewage sludge, recycle phosphorus, manage contaminants and reduce climate impact. Sweden's first full-scale sewage sludge pyrolysis plant will start up in 2026 at Roslagsvatten's treatment plant in Margretelund. Using Roslagsvatten as a starting point, the report explores the pros and cons of sludge biochar and its market potential, and proposes a business model for Swedish water and wastewater organisations that take into account today's conditions with the future in mind.

The report has examined how sludge biochar can contribute to sustainable sludge management and what factors influence its market potential. The current state of research shows that pyrolysis provides a method to hygienise sludge, manage contaminants, such as PFAS, microplastics and pharmaceutical residues, while some of the phosphorus in the sludge can be recirculated through the sludge biochar. This justifies pyrolysis of sewage sludge from an environmental perspective. The pyrolysis process stabilises some of the carbon to the extent that it can be counted as a carbon sink, which together with reduced greenhouse gas emissions from storage of sewage sludge also makes pyrolysis well justified from a climate perspective. The phosphorus, which mainly remains in the sludge biochar, can be returned to agriculture, but its plant availability varies and needs further evaluation.

The project was carried out through literature reviews, interviews with key stakeholders and collection of experiences from the global biochar industry. There is a growing interest in sewage sludge pyrolysis in the water and wastewater industry, but knowledge gaps on the long-term properties of sludge biochar remain. In particular, the report highlights the need to study plant availability of phosphorus and nitrogen and heavy metal immobilisation over time and ensure that the content of the sludge biochar complies with regulatory limit values. Practical trials and on-farm studies are crucial to ensure the usability and acceptance of the material, especially in agriculture where the potential to use sludge biochar as a fertiliser is judged to be greatest and closest in time.

The market for sludge biochar is in its infancy, and the report emphasises the importance of building local networks and establishing trust with potential users. There is a positive attitude from the agricultural sector, but the willingness to pay for sludge biochar is linked to the seller's ability to guarantee the quality and properties of the material. Municipal water and wastewater organisations should benefit from cooperation within the industry to share knowledge and overcome common challenges.

Based on Roslagsvatten's conditions, the report shows that pyrolysis of sewage sludge can be economically justified, primarily through the potential for reduced disposal costs for the sludge. The same conclusion does not necessarily apply to water and wastewater organisations with lower disposal costs than Roslagsvatten. Revenue from carbon credit trading is a possibility, but to ensure economic viability, customised business models are required that evolve in line with increased knowledge, changing regulations and market developments.

The report presents a feasibility study for Swedish water and wastewater organisations. It emphasises that pyrolysis can play a key role in the sustainable sludge management of the future and calls for continued investment in research, practical trials and cross-industry collaboration.

Begrepp och förkortningar

Additionalitet	Princip som innebär att en åtgärd för att binda koldioxid endast anses bidra till utsläppsminskning om den inte skulle ha skett utan ekonomiskt stöd från krediter. Begreppet definieras i sin helhet i avsnitt 7.1.
Affärsmodell	Beskrivning av hur en verksamhet ska skapa värden från sina produkter eller tjänster.
AMA	Allmän material- och arbetsbeskrivning, ett referensverk för att upprätta och läsa tekniska beskrivningar inom bygg- och anläggningsbranschen. AMA-jordar specificeras inom detta regelverk och används bland annat i anläggningsprojekt.
Aromaticitet	Ett kemiskt begrepp som beskriver hur kolatomer är arrangerade i stabila ringstrukturer, vilket påverkar biokolets egenskaper.
BCR-krediter (Biochar Carbon Removal)	Certifierade krediter kopplade till kolinlagring genom produktion och användning av biokol eller slambiokol.
Biokol	Pyrolyserat växtmaterial som används på ett sådant sätt att det ingående kolet förblir lagrat som en kolsänka eller ersätter fossilt kol i industriell tillverkning.
EBC (European Biochar Certificate)	Certifieringsstandard för biokol som fastställer kvalitetskriterier för dess produktion, sammansättning och miljöpåverkan.
HTC-teknik (Hydrotermisk karbonisering)	En process där biomassa omvandlas till kolhaltigt material under ett tryck på 20–35 bar och en temperatur på 180–260 ˚C i en syrefattig miljö.
HTC-kol	Det kolrika material som produceras genom hydrotermisk förkolning (HTC).
Hydrokol	Annat namn för HTC-kol.
Inertinit	Den mest stabila kolstrukturen i jordskorpan och kan därför användas som ett riktmärke vid uppskattning av kolföreningars permanens.
Kolinlagring	Process där kol binds i mark eller material och därmed minskar koldioxidhalten i atmosfären.
Kolkredit	Ett överlåtbart tillstånd som ger innehavaren rätt att släppa ut ett ton koldioxid eller motsvarande växthusgaser, vilket fungerar som en marknadsbaserad mekanism för att minska de totala utsläppen.
PAH (polycykliska aromatiska kolväten)	En grupp organiska föreningar som kan bildas vid ofullständig förbränning och kan vara miljö- och hälsoskadliga.
PFAS (per- och polyfluorerade alkylsubstanser)	En stor grupp syntetiska kemikalier som är svårnedbrytbara och kan vara skadliga för människor och miljö.
PFAS4	En grupp av fyra specifika PFAS-ämnen som ofta används för att bedöma föroreningsnivåer i miljön.
PFAS22	En utvidgad lista av 22 PFAS-ämnen som analyseras för att få en bredare bild av PFAS-föroreningar.
Pyrolys	Upphettning av organiskt material till temperaturer mellan 350 och 1000 °C under syrefattiga förhållanden, vilket leder till nedbrytning och omvandling till biokol och gas.
Pyrolysprocess	Process från biomassa till biokol där eventuella behov av förbehandling av biomassan och efterbearbetning av biokolet inkluderas. För pyrolys av avloppsslam inkluderas torkning av avvattnat avloppsslam som ett steg i pyrolysprocessen.

Pyrolysreaktor	Anläggning där pyrolys sker. Vid pyrolys av avloppsslam kan pyrolysreaktorn vara integrerad med pyrolysprocessens torkningssteg genom att avloppsslammet torkas med värme från förbränning av pyrolysgaser.
Revaq	Ett certifieringssystem för avloppsreningsverk som syftar till att minska föroreningar i avloppsslam och möjliggöra säker återföring av näringsämnen till jordbruket.
Rötning	En biologisk process där organiskt material bryts ner av mikroorganismer under syrefria förhållanden, vilket producerar biogas och en näringsrik rötrest.
Slambiokol	Pyrolyserat avloppsslam som används på ett sådant sätt att det ingående kolet förblir lagrat som en kolsänka eller ersätter fossilt kol i industriell tillverkning.
Slamkol	Ett alternativt begrepp för slambiokol. Inom Revaqs terminologi inkluderar begreppet slamkol dock även hydrokol, vilket är ett material med skilda egenskaper.
TS-halt (torrsubstanshalt)	Andelen fast material i ett prov efter att vattnet avlägsnats, vanligtvis uttryckt i procent.

1 Bakgrund och introduktion

Utredningen Hållbar slamhantering (SOU 2020:3) om en giftfri och cirkulär återföring av fosfor från avloppsslam syftade till att se över utformning av ett förbud mot spridning av avloppsslam och ett krav på hygienisering av avloppsslam samt hållbar recirkulering av fosfor. I väntan på ett nytt slamdirektiv från EU och för att möta den osäkra framtiden vad gäller användningen av avloppsslam har VA-branschen börjat utreda olika tekniska lösningar för att utveckla befintliga slambehandlingsmetoder.

I Hållbar slamhantering (SOU 2020:3) nämns pyrolys som den enda metod, utöver slamspridning, som säkerställer recirkulering av fosfor och som samtidigt återför en andel kol till åkermarken. Efter utredning och utvärdering av olika slambehandlingsmetoder, däribland hydrotermisk karbonisering (HTC), har Roslagsvatten fattat beslut om att basera sitt nya avloppsreningsverk i Margretelund på pyrolys av avloppsslam. Som första VA-organisation i Sverige kommer Roslagsvatten vid driftstart år 2026 att ha behov av avsättning för pyrolyserat avloppsslam, i rapporten benämnt slambiokol. I och med avsaknaden av tidigare erfarenheter av slampyrolys i Sverige såg även Roslagsvatten behovet av att identifiera de områden där det i dag saknas kunskap och riktlinjer för hur VA-organisationer ska förhålla sig till pyrolys av avloppsslam, slambiokol och relaterade kolkrediter.

1.1 Marknadens mognad och begreppsförtydliganden

Produktionen av och marknaden för slambiokol i Sverige kan i dagsläget beskrivas som obefintlig. Roslagsvatten är, i och med sitt beslut att investera i pyrolys, pionjärer och en viktig byggsten i en framtida marknadsutveckling. Slambiokol är en term som myntats inom den svenska VA-branschen med hänvisning till den etablerade marknaden för pyrolys av växtmaterial, så kallat biokol.

Rapporten skiljer noggrant på slambiokol och biokol. Det finns signifikanta skillnader mellan slambiokol och olika typer av biokol, framför allt med avseende på näringsinnehåll, renhet från föroreningar och kolhalt, även om man tar hänsyn till variationer inom begreppet biokol som uppstår som ett resultat av olika växtmaterial och produktionstekniker. Dessutom har biokol en förhållandevis etablerad marknad, vilket gör att om biokolets förutsättningar med avseende på egenskaper, marknad och regelverk antas gälla även för slambiokol finns det avsevärda risker när det gäller bedömning av potential för slambiokol. Slambiokol benämns i andra sammanhang även slamkol, exempelvis inom Revaq. Certifierade och säljbara kolsänkor som genereras vid användning av slambiokol benämns i rapporten som BCR-krediter (BCR = Biochar Carbon Removal).

1.2 Metod och projektgrupp

Innehållet i denna rapport är insamlat genom litteraturstudier, projektmöten, intervjuer och författarnas egna erfarenheter från den svenska VA-branschen och den globala biokolbranschen.

I projektet har aktörer med koppling till hantering av avloppsslam engagerats i en projektgrupp som bidragit med såväl erfarenhet som analyser och framtidsspaningar genom ett antal projektmöten och direktkontakt med författarna. I den mån det är möjligt har projektgruppens input förlagts med källor, medan analyser som ett resultat av diskussioner på projektmöten beskrivs i texten. Dessutom har det ingått en expertgrupp med fokus på handel med kolkrediter för klimatkompensation. Input från expertgruppen

refereras till unisont som expertgruppen då de lämnade sitt bidrag till kapitel 6–8 i rapporten genom presentation och diskussion under projektmöte och kompletterande dialog över telefon och e-mail. Samtliga projektdeltagare listas i Tabell 1.1.

Konsulter från EcoTopic AB, som erhållit uppdraget att författa huvuddelen av rapporten, har arbetat inom den globala biokolbranschen sedan 2012 och dessförinnan inom VA-branschen. Genom EcoTopics systerbolag, Biokolprodukter Global AB, har författarna även möjlighet att ge en bild av marknaden kring jordförbättring och gödning. Författarnas egen erfarenhet eller egna analyser efterföljs inte av källhänvisning. Det gäller även den del som skrivits av Roslagsvatten: avsnitten 9.3.3 till 11.1.9.

Tabell 1.1
Samtliga projektdeltagare uppdelade i projektgrupp, expertgrupp och referensgrupp.

Namn	Organisation	Roll
Projektgrupp		
Aleksandra Lazic	Roslagsvatten AB	Huvudprojektledare
Anders Henriksson	Roslagsvatten AB	Strateg/Affärsutvecklare
Lotta Ek	EcoTopic AB	Projektledare/Utförare
Mattias Gustafsson	EcoTopic AB	Projektledare/Utförare
Jacqueline Hellmann	EcoTopic AB	Projektledare/Utförare
Anders Aronsson och Maja Lundell	Syvab AB	Projektmedlem och granskare
Andriy Malovanyy och Dan Fujii	Stockholm Vatten och Avfall AB	Projektmedlem och granskare
Caroline Dahlberg	Ragn-Sells AB	Projektmedlem och granskare
Cecilia Bertholds	Käppalaförbundet	Projektmedlem och granskare
Cecilia Hagsköld	Norrtälje Vatten och Avfall AB	Projektmedlem och granskare
Christian Wieth	AquaGreen	Projektmedlem och granskare
Elisabeth Aulenius och Johnny Roslund	Gästrike Vatten AB	Projektmedlem och granskare
Gert Kindgren	Biototal AB	Projektmedlem och granskare
Ingemar Gruvaeus	Yara AB	Projektmedlem och granskare
Magnus Eliasson	NODRA AB	Projektmedlem och granskare
Sofie Orvestedt	Uppsala Vatten och Avfall AB	Projektmedlem och granskare
Expertgrupp		
Christian Baresel och Kenneth Möllersten	IVL Svenska Miljöinstitutet AB	Expert och granskare av kap. 6–8
David Andersson	ECOERA AB	Expert och granskare av kap. 6–8
Ida Sylwan	RISE Research Institutes of Sweden AB	Expert och granskare av kap. 6–8
Ludvig Landen	Biochar.tech	Expert och granskare av kap. 6–8
Referensgrupp		
Klara Westling och Maria Holmgren	Svenskt Vatten AB	

2 Syfte och mål

Syftet med förstudien är att beskriva potentiella marknader för slambiokol baserat på dagens förutsättningar relaterat till pyrolys av avloppsslam. Målet är att belysa hur svenska VA-organisationer kan nyttja dessa förutsättningar genom en affärsmodell som beaktar framtida utveckling och behov.

2.1 Frågeställningar

För att uppfylla syftet undersöker rapporten följande frågor:

1. Vilka krav och regelverk är anknutna till användning av slambiokol som gödnings- och/eller jordförbättringsmedel?
2. Vilka är de potentiella marknaderna med avseende på geografi, ekonomi och marknadssegment?
3. Vilka är för- och nackdelarna jämfört med befintliga alternativ till gödnings- och jordförbättringsmedel samt filtermaterial?
4. Hur ser marknaden, affärsmodellen och ekonomin ut för kolkrediter från slambiokol?
5. Vilken inverkan och eventuella risker innebär kolkreditmarknadens inställning till begreppet additionalitet?
6. Kan standarder för kolkrediter inkludera minskade utsläpp av metan och lustgas i bedömningen av kolkreditens storlek?
7. Vilket potentiellt ekonomiskt värde har slambiokol?
8. Hur ser en affärsmodell runt pyrolys av slam ut för VA-organisationer där man tar hänsyn till framtida utvecklingsmöjligheter?

2.2 Avgränsningar

Rapportens innehåll tar sin utgångspunkt i erfarenheter från Roslagsvattens beslut om att investera i Sveriges första avloppsreningsverk med pyrolys i Margretelund, Åkersberga. Eftersom såväl produktionen som användningen av slambiokol fortfarande är i sin linda drar författarna paralleller till framför allt avloppsslam och biokol för att beskriva och bedöma den framtida marknaden för slambiokol.

Fokus har också lagts på att belysa vilken kunskap vi har om slambiokol genom forskning och vilken kunskap som fortsatt inte kan anses säkerställd. Detta resulterar i att rapporten främst kan ge vägledning med avseende på användningsområden och identifiera utvecklingsbehov snarare än att presentera definitiva lösningar.

2.3 Läsanvisningar

Rapporten är uppdelad i tre huvudsakliga delar och utgår från den kunskap som Roslagsvatten, i sin roll som Sveriges första slambiokolsproducent, känt ett behov av och identifierat som värdefull även för andra VA-organisationer med intresse för slambiokol. Varje del kan läsas separat även om det förekommer hänvisningar mellan de olika delarna.

- Kapitel 3–5 beskriver slambiokolets egenskaper, relevanta regelverk och marknadspotential för slambiokol.
- Kapitel 6–8 beskriver marknaden för BCR-krediter, betydelsen av begreppet additionalitet samt möjligheten att inkludera certifiering av minskade utsläpp av metan och lustgas.

- I kapitel 9–11 diskuteras motiv för att pyrolysera avloppsslam samt alternativ för värdekedja och affärsmodell för VA-organisationer relaterat till slambiokol.
- Rapportens slutsatser finns sammanfattade i kapitel 12.
- Rapporten innehåller två bilagor. Bilaga A innehåller jämförelser mellan slambiokol och produkter som skulle kunna substitueras eller kompletteras med slambiokol. Bilaga B innehåller en lista över de parter som intervjuats inom arbetet med rapporten.

3 Att pyrolysera avloppsslam

Pyrolys innebär termisk nedbrytning av organiskt material i syrebegränsad miljö. Marknaden för pyrolysteknik i Europa kan beskrivas som ung, vilket återspeglas i leverantörers varierande utbud med hänsyn till få referenser, stora skillnader i tekniska processer, kravställning på ingående material, samt energi- och kolbalans. Pyrolysteknik kan användas för att behandla en bred variation av ingående material såsom växtbaserad biomassa för att producera biokol (EBC 2023) eller som en metod att återvinna bildäck (Han et al. 2023).

Avloppsslam utgörs av de fasta partiklar som avskiljs vid avloppsvattenrening och innehåller utöver näringsämnen såsom fosfor och kväve även spårelement, tungmetaller, organiska ämnen samt mikroorganismer. I rapporten avses avloppsslam även när begreppet slam används. Hur processen från avloppsslam till slambiokol ser ut kommer att variera beroende på val av teknik och verksamhetens förutsättningar, men för att ge läsaren en generell översyn beskriver vi den förenklat nedan och illustrerat i Figur 3.1.

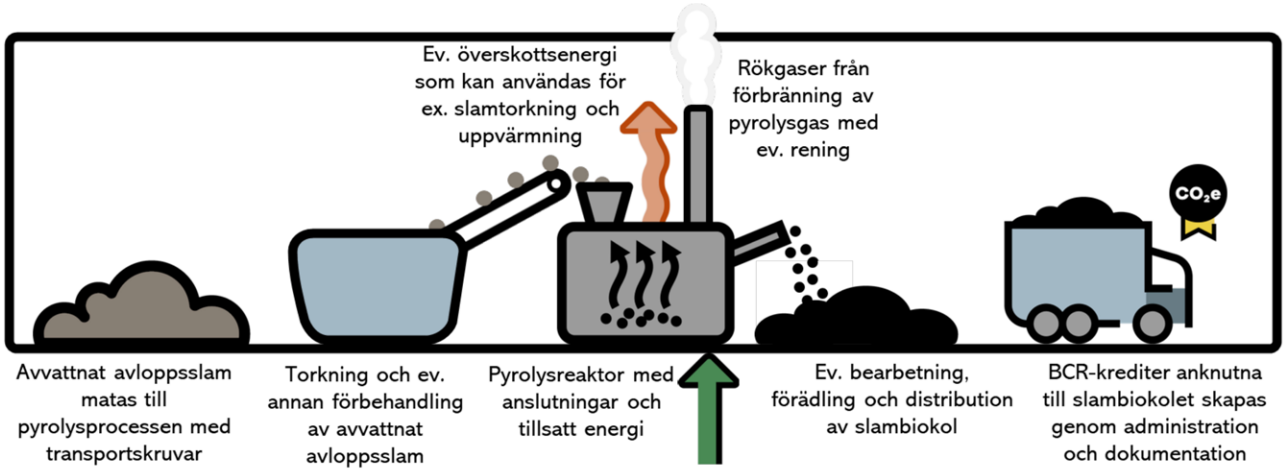
Avvattnat avloppsslam från avloppsreningsverket matas till pyrolysprocessen via transportskruvar. Slambehandlingen innan pyrolysprocessen kan variera och beskrivs inte i denna rapport. Pyrolysprocessen i denna förstudie avser samtliga steg från avvattnat avloppsslam till slambiokol, inklusive torkning av avloppsslammet.

Beroende på val av pyrolysteknik kan leverantörerna ställa olika krav på avloppsslammet, exempelvis TS-halt (torrsubstanshalt), värmevärde eller förekomst av orenheter såsom grus. TS-halt och värmevärde påverkar hur mycket energi som behövs för att torka avloppsslammet. Beroende på val av teknikleverantör kan torkningen vara integrerad med och i samma leverans som pyrolysreaktorn eller en fristående teknik som upphandlas separat. Vid integrerad torkning och pyrolys används pyrolysens överskottsvärme för att torka avloppsslammet. Detta är även möjligt vid separata tekniker. Beroende på upplägg kan det därmed finnas behov av mellanlagring av det torkade avloppsslammet. Andra exempel på förbehandling för att öka värmevärdet är pelletering.

Det torkade avloppsslammet matas in i pyrolysreaktorn. Hela pyrolysprocessen kan behöva anslutning av el, vatten och eventuell startenergi. Startenergin kan exempelvis utgöras av diesel, natur- och biogas, och varierar mellan olika tekniker. Pyrolysen genererar en pyrolysgas som vid förbränning genererar värme som kan användas för torkning av det avvattnade avloppsslammet samt eventuellt generera ett överskott av värme. Överskottsvärmen kan exempelvis användas för uppvärmning av lokaler. Rökgaser från förbränning av pyrolysgasen kan behöva renas med till exempel en skrubberteknik.

Slambiokolet matas ut ur pyrolysreaktorn och kan därefter bearbetas eller förädlas och distribueras till användare. Exempel på bearbetning kan vara släckning med vatten eller pelletering. Exempel på förädling är inblandning av näringsämnen. Förädlingen kan göras i anslutning till pyrolysprocessen eller av annan extern part. Pyrolys utgör en godkänd teknik för hygienisering, varför lagring endast behövs i väntan på slutanvändning.

Om producenten av slambiokol även vill generera en säljbar kolsänka kopplad till slambiokolet, så kallad BCR-kredit, måste hela processen certifieras. Slutligen administreras BCR-krediterna i samband med användning av slambiokolet. Processen för att generera BCR-krediter beskrivs i avsnitt 6.



Figur 3.1
Generell och förenklad beskrivning av processen från avloppsslam till slambiokol.

Erfarenhet från pyrolys av avloppsslam i Sverige och i Europa är begränsad, varför incitament för pyrolys i många fall bygger på potential som uppvisats i studier och från ett fåtal producenter. Detta är dock en naturlig situation för alla nya branscher och företeelser, men ändå något att ha i åtanke.

3.1 Slambiokolets egenskaper och variation

Slambiokolets och andra biokols egenskaper och innehåll påverkas i hög grad av det ingående materialets sammansättning, såsom kolhalt, vattenhalt, näringsämnen, tungmetallinnehåll, organiska föroreningar och partikelstorlek, samt rådande förhållanden i pyrolysprocessen, där särskilt temperatur och upphettningshastighet spelar avgörande roller (Xing et al. 2020; Tomczyk et al. 2020; Zhang et al. 2015).

3.1.1 Påverkan på slambiokol av rötning och kemisk fällning i avloppsreningen

Både pyrolysens förlopp och slambiokolets egenskaper påverkas i hög grad av det specifika avloppsslammets sammansättning. Om avloppsslammet till exempel har genomgått rötning, processen för att producera biogas, minskas dess kolhalt och därmed dess energiinnehåll. Slambiokol framställt från orötat avloppsslam tenderar att ha ett något högre kolinnehåll och ett lägre askinnehåll jämfört med slambiokol från rötat avloppsslam (Tay et al. 2001; UKWIR 2023a). Skillnaden verkar dock inte vara linjär mot det ursprungliga kolinnehållet och mot hur mycket kol som försvinner i rötningen (Gustavsson 2024, pers.kom.). Slambiokol från orötat slam visade sig i en studie ha en större specifik yta och en mer omfattande porvolym, vilket förbättrar dess potential för adsorption (Tay et al. 2001). Samtidigt bedöms stora variationer kunna komma att råda mellan olika typer av slambiokol.

Avloppsslam som har genomgått kemisk fällning ger ett slambiokol med högre askhalt och lägre totalt kolinnehåll, då fällningskemikalierna återfinns i slambiokolet efter pyrolysprocessen (Xing et al. 2020). Det är möjligt att kemisk fällning av avloppsslam även påverkar växttillgängligheten av fosfor i slam och därefter slambiokolet (läs mer i avsnitt 3.1.6).

3.1.2 Pyrolysprocessens påverkan

Miljöförhållanden i pyrolysreaktorn har betydande inverkan på det resulterande slambiokolets egenskaper (Zhang et al. 2015). Pyrolys sker vanligtvis vid temperaturer mellan 350 och 1000 °C (EBC 2023). Generellt sett leder högre temperatur till ökad askhalt, högre pH och större porvolym och specifik yta. Samtidigt minskar utbytet av fast produkt eftersom en större del av det ingående materialet avgår i gasform (Singh et al. 2020a; Zhang et al. 2015). Med stigande temperatur ökar också kolets stabilitet vilket

gör det mer motståndskraftigt mot nedbrytning (Tomczyk et al. 2020; Sørmo et al. 2024b). Denna ökade aromaticitet ger materialet hydrofoba egenskaper, vilket innebär att vattenmolekyler binds mindre lätt till kolets yta, medan hydrofoba ämnen som många PFAS-molekyler och andra organiska ämnen kan attraheras till ytan (Sørmo et al. 2024b). Vissa grundämnen, i synnerhet kväve, avgår i större utsträckning i pyrolysprocesser i takt med att pyrolystemperaturen stiger, medan koncentrationen av andra ämnen, som bland annat fosfor, ökar (Ding et al. 2016; Zhang et al. 2015).

Pyrolystemperaturen har praktiska implikationer för biokolens användningsområden. Lågtemperaturbiokol kan generellt sett vara mer lämpligt som jordförbättringsmedel tack vare sitt högre innehåll av lättillgängliga näringsämnen (Ding et al. 2016; Zhang et al. 2015). Högtemperaturbiokol kan bland annat fungera bättre som filter för organiska föroreningar (Zhang et al. 2015; Singh et al. 2020a), ämnen med negativa laddningsytor (Tan et al. 2020), samt har större potential som kolsänka (Mašek et al. 2019; Zhang et al. 2015). Genom att justera pyrolystemperaturen kan man teoretiskt skräddarsy biokolets eller slambiokolets egenskaper för specifika ändamål. Det är dock viktigt att notera att en teknik som kan köpas på hyllan oftast är designad för att arbeta inom ett snävt temperaturintervall, vilket gör att det kan vara svårt att justera temperaturen i efterhand. I fallet med avloppsslam finns dessutom ofta krav på att uppnå en viss avskiljning av föroreningar under pyrolysen, vilket ställer ytterligare begränsningar på den lägsta möjliga temperaturen, beroende på det specifika slammets innehåll (Chiari et al. 2024). Läs mer om tungmetaller och organiska föroreningar i avsnitten 3.1.7 och 3.1.8. Roslagsvatten kommer att använda en pyrolysteknik från företaget AquaGreen, vars teknik är utvecklad för att verka vid ca 650 °C.

3.1.3 Kolhalt och kolstabilitet

Återförsel av slam kan öka kolhalten i marken, men effekten beror på markens ursprungliga kolhalt, klimatförhållanden och slambehandling (UKWIR 2023a). En stor del av kol i opyrolyserat avloppsslam kommer att brytas ned inom en relativt kort tidsperiod. Enligt Svenskt Vattens klimatverktyg antas endast cirka 35 % av kolet bindas i marken vid slamspridning, med en kolinlagringstid på ungefär 20–30 år (Svenskt Vatten 2024b). Detta kan jämföras med pyrolyserade material, där den stabila kolstrukturen möjliggör en betydligt längre kolsänka på 100-tals till 1000-tals år (Carbonfuture 2025). Läs mer i avsnitt 4.6.

Kolhalten i pyrolyserat avloppsslam har uppskattats till 45 % när slammet inte har rötats, medan den i pyrolyserat rötat avloppsslam uppskattats till 29 % (UKWIR 2023a). Drygt 40 % av det ursprungliga kolinnehållet i avloppsslammet stabiliseras under pyrolys och kvarstår i slambiokolet enligt AquaGreen. Detta är ett genomsnitt av knappt 40 slamtyper där 80–90 % av avloppslammen uppskattas ha varit orötade (Wieth 2024, pers.kom.). Enligt en studie från Storbritannien varierade kolretentionen, det vill säga hur mycket av det ursprungliga kolet som faktiskt bevaras genom pyrolysprocessen, från avloppsslam till slambiokol med mellan 10–35 % beroende på typ av avloppsslam och huruvida det hade rötats eller inte (UKWIR 2023a). Variationer uppskattas kunna bero på slamhanteringsprocessen, egenskaper hos det specifika avloppsslammet och pyrolysprocessen, inklusive specifik teknik och pyrolystemperatur.

Kolet i slambiokol finns i form av stabila cykliska formationer, en så kallad aromatisk struktur (Cao et al. 2024). Graden av aromatisk struktur är avgörande för kolens stabilitet och påverkar slambiokolets potential som kolsänka. Högre pyrolystemperatur ökar andelen aromatisk struktur och därmed stabilitet i jorden tillika kolsänkepotentialen (Sørmo et al. 2024b; Xing et al. 2020; Mašek et al. 2019; Zhang et al. 2024).

Enkla analyser av biokolets förhållande mellan väte och organiskt kol, H/C_{org}, är en indikator på graden av förkolning och stabilitet (Budai et al. 2013; EBC 2023). Ju lägre värde, desto stabilare kol. Enligt två etablerade certifieringsstandarder ska H/C_{org}

understiga 0,7 för att klassas som ett biokol eller slambiokol och därmed vara stabilt ur ett perspektiv som överstiger 100 år (Puro.earth 2024e; EBC 2022). Dock ställs kravet att H/C_{org} ska understiga 0,4 för att certifiera kolsänkan enligt standarden Global Biochar C-sink och därmed vara stabilt under en tid som överstiger 1 000 år (EBC 2023). I Tabell 3.1 presenteras kolhalt och kvoten H/C eller H/C_{org} för olika slambiokol. H/C anges i det fall analys ej gjordes för H/C_{org} men typiskt sett så ligger dessa två värden mycket nära varandra, vilket gäller för alla slags biokol. Tabell 3.1 illustrerar hur kvotvärdet kan hamna både över och under 0,4 hos olika slambiokol.

Tabell 3.1
Kolhalt och H/C respektive H/C_{org} för olika slambiokol. Det saknas information om huruvida avloppsslammen har rötats före pyrolys.

Slambiokol nr	Kolhalt (C) % (w/w)	Stabilitet (H/C eller H/C_{org})	Källa
1	29,0	0,44	Oumar (2024)
2	25,8	0,54	Oumar (2024)
3	25,9	0,44	Oumar (2024)
4	44,3	0,29	Reichardt (2024, pers.kom.)
5	38,0	0,38	Reichardt (2024, pers.kom.)
6	23,9	0,32	Reichardt (2024, pers.kom.)

Höga nivåer av vissa mineral, som bedöms kunna förekomma i avloppsslam i större utsträckning än växtbaserade material, kan leda till en ökning av syre- och väteinnehållet och minska andelen aromatiskt kol (Xing et al. 2020). En bidragande orsak till detta kan vara att mineralkomponenter begränsa värmefördelningen och frisättningen av nedbrutna flyktiga ämnen under förkolningsprocessen, vilket försvårar bildningen av aromatiskt kol och kan bidra till en högre H/C-kvot (Xing et al. 2020).

Stabilt kol, som det som finns i pyrolyserade material, bidrar till att förbättra jordens bördighet (Tomczyk et al. 2020). Den stabila kolstrukturen i slambiokolet anges även kunna bidra till en viss strukturförbättring, ökad vattenhållande förmåga som resulterar i minskat bevattningsbehov vid användning i jord och ökad mikrobiell mångfald (Hosseinian et al. 2024; Ahmad et al. 2022). När det gäller slambiokol utgör fosfor- och tungmetallinnehållet begränsande faktorer för hur mycket som får spridas på jordbruksmark och därmed hur stor inverkan det har på jordens struktur. Gränsvärden beskrivs närmare i avsnitt 3.1.7 om tungmetaller och kapitel 4 kopplat till regelverk.

3.1.4 Näringsämnen i slambiokol

Eftersom pyrolys av avloppsslam är en ny företeelse, återstår det att fastställa hur stora mängder näringsämnen som kan förväntas finnas i slambiokol. Data i tabell Tabell 3.2 är en indikation, men innehållet kan variera beroende på specifikt avloppsslam och pyrolysprocess.

Tabell 3.2
Uppskattning av näringsinnehåll i slambiokol samt uppgift om pyrolystemperaturens påverkan.

Näringsämne	Vid 650 °C (AquaGreen)	Vid 550 °C och 770 °C (UKWIR 2023b)	Temperaturpåverkan
Kväve (N)	1–3 % av TS	ca 38 kg/ton (3,8 %)	Minskar vid högre temperaturer. Ammoniumkväve bevaras under 400 °C, medan andra former försvinner redan vid 200 °C (Vali et al. 2021).
Fosfor (P)	5–6 % av TS	ca 23–25 kg/ton (2,3–2,5 %)	Stabil upp till ca 850 °C, därefter börjar förluster ske (Vali et al. 2021).
Kalium (K)	ca 1 % av TS	ca 3–4 kg/ton (3–4 %)	Stabil upp till ca 850 °C (Vali et al. 2021).
Magnesium (Mg)	ca 1 % av TS	–	Stabil upp till ca 850 °C (Vali et al. 2021).
Natrium (Na)	–	–	Stabil upp till ca 850 °C (Vali et al. 2021).
Kalcium (Ca)	–	–	Förloras först vid temperaturer över 1 240 °C (Gaskin et al. 2008).

Sammanfattningsvis kan man förvänta sig en betydande förlust av kväve och en koncentrering av övriga näringsämnen i slambiokol som framställs vid temperaturer omkring 650 °C, som i Roslagsvattens fall.

3.1.5 Kvävets och kaliumets växttillgänglighet

Enligt Zhang et al. (2015) styr pyrolysens temperatur växttillgängligheten av näringsämnen i slambiokol. Det kväve som inte förgasas under pyrolys omvandlas till mindre växttillgängliga former vid högre temperaturer. Detta sker genom att kvävet gradvis integreras i den stabilare kolstrukturen (Clough et al. 2013; Torres-Rojas et al. 2020). Effekten på kvävets växttillgänglighet är dock specifik för varje jord- och slambiokolkombination (Clough et al. 2013).

Kaliumhalten i slambiokol ökar med högre pyrolystemperaturer (>500 °C), men den växttillgängliga andelen kalium är högre vid lägre temperaturer (Bilas et al. 2023). Bilas et al. (2023) fokuserar inte specifikt på biokol från slam. Gällande innehåll av kalium i specifikt slambiokol konstaterar Ngo Ndoung et al. (2023) att slambiokol inte innehåller särskilt höga kaliumnivåer på grund av att kalium tenderar att förekomma i vattenfasen och ej följa med den fasta slamfraktionen.

3.1.6 Fosforns växttillgänglighet

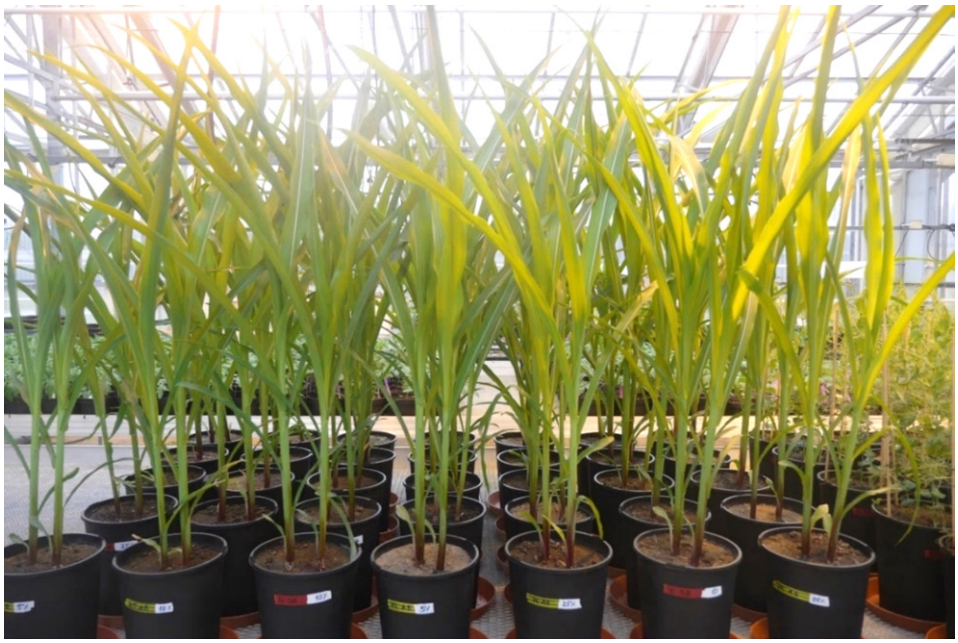
Fosforns värde som gödningsmedel beror på dess form och tillgänglighet för växter och påverkas bland annat av hur fosforn sitter bunden i slambiokolet, men även av omgivande miljö som exempelvis pH, kalciumförekomst och mikroliv (Buss et al. 2018; Glaser & Lehr 2019; Shen et al. 2011). Hur mycket av fosforn i slambiokol som är växttillgänglig är en nyckelfråga eftersom fosforrecirkulering till jordbruksmark är en av drivkrafterna för pyrolys av avloppsslam. Samtidigt är det ibland otydligt vad som menas med växttillgänglig fosfor eftersom den kan vara mer eller mindre växttillgänglig beroende på omständigheter och tidsperspektiv (Linderholm 2011; Shen et al. 2011). När det i kommande stycken skrivs om fosforns växttillgänglighet används uttrycket i enlighet med hur det framställs i originalkällan. Hur växttillgängligheten bedöms i dessa källor är författarnas ansvar. Nedan redogörs för forskningens bedömning men det är värt att påpeka att även näringsämnens växttillgänglighet i avloppsslam utgör en källa till diskussion, och litteraturstudien visar att framför allt fosforns växttillgänglighet i avloppsslam är starkt beroende av förutsättningar ovan jord (exempelvis val av växter och förekommande väder) och i den jord som avloppsslammet sprids på (Linderholm 2011).

Fosfor är direkt växttillgänglig som oorganiska fosfatjoner i vattenfasen i jorden och fosforn kan lätt adsorberas, omvandlas till organiska föreningar, fällas ut eller binda till mineraler (Glaser & Lehr 2019; Prasad & Chakraborty 2019; Shen et al. 2011). Lösta fosfatjoner som binds till ämnen som järn, aluminium och kalcium samt partiklar i jorden minskar växttillgängligheten i varierande grad beroende på form och jordsammanhang (Shen et al. 2011; Prasad & Chakraborty 2019). För fosfor bundet i så kallade primära fosformineraler som apatit tar det ”extremt lång tid” för fosforn att bli tillgänglig (Prasad & Chakraborty 2019). Fosfor kan således förekomma i olika pooler, från direkt växttillgängliga till mycket stabila former, som dessutom kommer bero av den specifika jordmiljön (Shen et al. 2011).

Glaser och Lehr (2019) konstaterar att fosforlösligheten i förkolnad biomassa är lägre än i oförkolnat material. Även Kopp et al. (2023) konstaterar att termisk behandling, som till exempel pyrolys, ofta genererar låg fosfortillgänglighet för växter. Bornø et al. (2023) studerade fosforrelaterade processer i jord och hos växtrötter genom krukförsök där man jämförde effekten från slam och slambiokol pyrolyserat i 600 °C. Tillgänglig (labil) fosfor hittades endast i behandlingen med slam och man drog slutsatsen att slambiokolet behöver optimeras för att öka den kortsiktiga effekten som fosforgödningskälla. Man konstaterar att långsam frisättning av fosfor skulle kunna ske på sikt (Bornø et al. 2023), men det kvantifieras inte närmare.

Pyrolystemperaturen anges vara den huvudsakliga parametern för påverkan på pyrolyserade materials kemiska sammansättning (Vali et al. 2021). Flera källor indikerar att fosforns växttillgänglighet minskar i takt med stigande pyrolystemperatur då fosfor övergår till mer stabila former (Xing et al. 2020; Glaser & Lehr 2019; Zhang et al. 2024). Principen överensstämmer med växttillgängligheten för kväve och kalium, vilket beskrivs i avsnitt 3.1.5. Huruvida förhållandet är linjärt är svårt att avgöra, eftersom det finns variationer i resultaten mellan olika studier. Enligt Zhang et al. (2024) var dock ortofosfatfosfor (direkt växttillgänglig fosfor) den huvudsakliga fosforformen i termiskt behandlade avloppsslam, inklusive pyrolys vid 400–600 °C. I samma försök såg man att en del fosfor omvandlades till apatitfosfor. I svenska jordbrukssammanhang bedömer man apatitfosforn som i princip ej växttillgänglig, medan den inom skogsbruket med lägre pH däremot kan vara det i större utsträckning (Gruvaeus 2024, pers.kom.). Denna uppfattning bekräftas av Shen et al. (2011) som i sin rapport konstaterar att fosforstabiliteten i bland annat apatit generellt leder till en alltför långsam frisättning för att tillgodose grödornas behov. Dock har det visat sig fungera relativt väl i sura jordar, vilket potentiellt kan motsvara vissa skogsbruk. Zhang et al. (2024) anger hur markmiljön kan påverka växttillgängligheten av fosfor markant och man föreslår krukförsök för att validera växttillgängligheten för det specifika slambiokolet. Fosfortillgängligheten kan potentiellt också påverkas av om slammet har genomgått kemisk fosforfällning (Vali et al. 2021), vilket är en av parametrarna som kommer att undersökas inom ”Testbädd Ellinge”, ett försök som leds av VA SYD om avloppsslam och slambiokol (Sweden Water Research 2024). Ett treårigt försök med slambiokol är även på gång i Tyskland och utförs av ”German Phosphorus Platform” för att se effekterna av slambiokol i jord och för växtligheten (Gerber 2024, pers.kom.). Försöket är en utveckling av positiva resultat genererade från tidigare krukförsök där man bland annat sett över olika metoder för att öka växttillgängligheten av fosfor (Jacobi et al. 2022).

Inom det Vinnovafinansierade projektet Rest till Bäst genomfördes bland annat odlingstester med biokol och slambiokol med olika grödor i kruka på SLU, Alnarp (Figur 3.2). Även tester med bland annat slambiokol och olika grödor i fält genomfördes under två odlingssäsonger (Figur 3.3). Resultaten var dock så varierande att generella slutsatser ej kunde genereras (Larsson Jönsson et al. utan datum).



Figur 3.2
Odlingstester med biokol och slambiokol inom det Vinnovafinansierade projektet Rest till Bäst. Foto: EcoTopic AB.

Figur 3.3
Fältförsök inom projektet Rest till Bäst med bland annat slambiokol och olika grödor. Foto: Lars Lundahl, Orkla Foods Sverige AB.

En metastudie över fosfortillgänglighet efter tillsats av biokol och slambiokol på jordbruksmark globalt visade att slambiokol hade den högsta effekten på fosfortillgängligheten (Glaser & Lehr 2019). Dock varierade resultaten mellan studierna och resultaten för slambiokol kunde ej anses statistiskt signifikanta på grund av det begränsade antalet studier med just slambiokol. Generellt hade biokol producerat vid temperaturer under 600 °C den största positiva effekten på fosfortillgängligheten. Detta kan bero på att vid stigande temperatur reagerar fosfat med metalljoner i större utsträckning vilket leder till fosforimmobilisering (Xing et al. 2020). Glaser och Lehr (2019) visade att den högsta fosfortillgängligheten efter olika slags biokolapplikationer observerades i sura följt av neutrala jordar, och att biokol generellt behövde appliceras i förhållandevis stora mängder, minst 10 ton per hektar (eller 1 kg per kvadratmeter), för att ge signifikanta resultat. Rapporten indikerar sammantaget att slambiokol kan öka fosfortillgängligheten i jord men att tillsatsmängden av slambiokol i det försöket kan vara svårt att överföra i praktiken, inte minst på grund av gränsvärden för tungmetaller och fosfor som begränsar mängden slambiokol som kan spridas (läs mer i avsnitt 4.4.3). Baserat på Naturvårdsverkets genomsnittliga värden för totalfosfor, om 29 g/kg TS, i svenskt avloppsslam som spreds på åkermark år 2022, har en omräkning gjorts för att uppskatta totalfosforhalten i slambiokol (Naturvårdsverket 2023). Beräkningen bygger på antaganden om att ingen fosfor avgår vid pyrolys samt en omvandlingsfaktor på 42 % från torrsubstans i avloppsslam till torrsubstans i slambiokol, enligt uppgifter från teknikleverantören AquaGreen för representativt, orötat, danskt avloppsslam (Wieth 2024, pers.kom.). Om man utgår från maximal tillåten mängd tillförd fosfor om 22 kg per hektar och år i genomsnitt under en femårsperiod (Jordbruksverket 2021), möjliggörs spridning av drygt 320 kg slambiokol per hektar och år.

Svenska jordar kanske inte alltid korrelerar med de jordar som i studien av Glaser och Lehr (2019) hade fått bäst resultat. En konflikt kan också uppstå om höga pyrolystemperaturer, som krävs för att avskilja föroreningar (vilket berörs i avsnitt 3.1.7 och 3.1.8), samtidigt minskar växttillgängligheten av fosfor.

I ett fältförsök undersökte man fosforaspekten hos pyrolyserad rötrest framställd i 300 respektive 500 °C i omfattningen 15 ton/hektar och konstaterade att rötslamsbiokolet från 300 °C hade potential att ersätta mineralgödsling (de Figueiredo et al.

2020). Det är tveksamt om metoden i den rapporten motsvarar praktiskt realiserbara spridningsvolymer och egenskaper hos slambiokol framställt i högre temperatur.

Projektet Rest till Bäst genomförde lakförsök med olika typer av biokol, där mängden fosfatfosfor (direkt växttillgänglig) studerades. Slambiokolet släppte inte någon fosfatfosfor alls jämfört med de andra biokolen från park- och trädgårdsris, jordbruksrester och marint material (Sachpazidou et al. 2023).

Ett försök som EcoTopic genomförde på uppdrag av Linnéuniversitetet för Kalmar kommun och Växjö Småland Airport, år 2024, syftade primärt till att testa olika biokols potential att avskilja PFAS från vatten. Analys gjordes även på fosfatfosfor i vattnet. I försöket ingick bland annat fem olika slambiokol, inklusive ett från AquaGreen. Resultaten visade påtagliga variationer mellan hur mycket fosfatfosfor som initialt släpptes, varför slutsatsen är att vissa slambiokol kan släppa direkt växttillgänglig fosfor medan andra inte tycks göra det. Orsaken till variationen är inte fastställd.

Det pågår forskning och försök för att öka fosfortillgängligheten i biokol och slambiokol (Buss et al. 2022; Kopp et al. 2023). Buss, et al. (2022) återger hur försök med slam som behandlats med kaliumacetat innan pyrolys på labb genererade slambiokol med högre andel extraherbar fosfor. Andelen vattenextraherbar fosfor ökade till i genomsnitt 27 % av totalfosforinnehållet i pyrolys vid temperaturer mellan 400 och 900 °C, med tillsats av 5 % kaliumacetat. ”Detta motsvarar en 200-faldig ökning i förhållande till den obehandlade biokolkontrollen och är till och med en 5,5-faldig ökning i förhållande till avloppsslammet före pyrolys.” (egen översättning) (Buss et al. 2022). Dock identifierades en risk för ökad tillgänglighet av även tungmetaller. Buss et al. (2022) menar att metoden är enkel och ej särskilt kostsam. Kopp et al. (2023) behandlade olika pyrolyserade material, inklusive avloppsslam pyrolyserat i 600 °C, och olika slags aska med svavelsyra för att undersöka om det gick att öka den växttillgängliga andelen fosfor i materialen. I krukförsök med majs såg man en signifikant ökning av fosforupptag och tillväxt i de behandlade materialen, samtidigt som det ej sågs något ökat upptag av tungmetallernas tillgänglighet (Kopp et al. 2023). I ett annat försök där slambiokol behandlats med bland annat lut genererades liknande slutsatser: kemisk förbehandling kan förbättra slambiokols kortsiktiga värde som fosforgödsel (Kopp et al. 2024). Dock anger man att det behövs fler studier för att utvärdera ekonomisk genomförbarhet och potentiella miljörisker, såsom ökad tungmetallöslighet.

Sammanfattningsvis pekar litteraturen åt att pyrolys av avloppsslam påverkar fosforns form och tillgänglighet. De komplexa resultaten är troligen en naturlig konsekvens av att olika typer av slambiokol har varierande egenskaper, samtidigt som deras effekt påverkas av samverkan mellan olika parametrar i jordmiljön. Litteratur ger exempel på slambiokol som innehåller både stora andelar direkt växttillgänglig fosfor och andelar mycket stabil fosfor. Samtidigt saknas en entydig definition av vad som räknas som ”växttillgänglig” fosfor. Det finns exempel där man behandlat slambiokol med kaliumacetat, svavelsyra och lut för att öka den växttillgängliga andelen fosfor, vilket är intressanta metoder för att potentiellt förbättra recirkuleringen av snabbtillgängliga fosforformer genom förädling. Det är svårt att exakt uppskatta den kvantitativa andelen fosfor i slambiokol som är direkt växttillgänglig, liksom hur stor del som kan bli tillgänglig över tid och under vilka tidsperspektiv. Att bättre kartlägga fosfortillgänglighet inom tidsramar som är relevanta för jordbruk är en central fråga för slambiokolets värde som gödningsmedel. Därför är försök som Testbädd Ellinge, där olika typer av slambiokol, obehandlat avloppsslam och avloppsslam med olika fosforfällningsmetoder undersöks, särskilt viktiga att följa upp (Sweden Water Research 2024).

3.1.7 Tungmetaller

Vissa rapporter styrker potentialen att kunna avskilja tungmetaller som kvicksilver, kadmium, bly, arsenik och zink från avloppsslam med pyrolys. Kadmium, bly, arsenik och zink kan avgå vid högre temperatur (>600 °C) men påpekas av förhållandena

inne i pyrolysreaktorn och närvaron av bland annat alkalier, klorider, svavel och andra mineralämnen i substratet (Dong et al. 2015; Sørmo et al. 2024a). Kvicksilver har funnits vanligtvis kunna avskiljas från slam inom temperaturområdet 200–400 °C (Liu et al. 2022). Svenska försök på slampyrolys i kommersiell anläggning har visat att tillräckligt höga pyrolystemperaturer på uppåt 800 °C kunde avskilja det mesta av kadmiumet från avloppsslam (Paulsson 2020) och även i pyrolysförsök med tyskt avloppsslam har man sett att kadmiumavgången vid pyrolys över 750 °C är betydande (Bahr 2016). Vid temperaturer mellan 600 och 700 °C, vilket representerar Roslagsvattens anläggning, har teknikleverantören Aquagreen sett avgång av kadmium om 70 % och även högre nivåer för avloppsslam med högre klorinnehåll (Wieth 2024, pers.kom.). I Roslagsvattens pyrolysprocess kommer de tungmetaller som avskiljs att renas från rökgaserna med hjälp av en skrubberteknik. Skrubbervattnet leds sedan tillbaka till reningsverkets inkommande avloppsvatten. .

Xing et al. (2020) refererar i en systematisk översikt till rapporter som menar att slambiokol även har potential att immobilisera vissa former av tungmetaller i jord, bland annat tack vare förekomst av fosfatjoner från slambiokolet som bildar komplex och därmed minskar växtupptaget (Xing et al. 2020). Eftersom potentialen till tungmetallimmobilisering är komplex och beror av bland annat tungmetallens form, jordens och slambiokolens kemi går det inte att dra någon slutsats om denna potentials omfattning, men den verkar större hos slambiokol än träbaserade biokol (Xing et al. 2020). Det kräver en djupare litteraturstudie som ej ryms inom ramen för denna rapport men som ändå bedöms värd att nämna.

Trots att vissa tungmetaller avgår vid högre pyrolystemperatur är det tydligt att de flesta tungmetaller kommer att bli kvar i slambiokolet, och i takt med att andra ämnen avgår i pyrolysen innebär det en ökad koncentration av dessa. Samtidigt har försök visat att kvarvarande tungmetaller kan immobiliseras i slambiokolet och att den växttillgängliga och vattenlösliga mängden kan minska med högre pyrolystemperatur (Xing et al. 2020; Sørmo et al. 2024a). Vilka temperaturer som krävs för denna effekt samt hur stabil den är över tid för ett specifikt slambiokol i olika jordtyper bör undersökas närmare.

3.1.8 Organiska föroreningar

Utmaningen med avloppsslam är att det består av en blandning av organiska, viktiga och skadliga ämnen, där de senare begränsar möjligheten att återföra det obearbetat till åkermark. Avloppsslam kan exempelvis innehålla polycykliska aromatiska kolväten (PAH:er), polyklorerade bifenyler (PCB:er), dioxiner och furaner (PCDD/F), per- och polyfluorerade alkylsubstanser (PFAS), läkemedelsrester och mikroplaster (Schlederer et al. 2024; Chiari et al. 2024).

Biochar Europe, tidigare European Biochar Industry (EBI), refererar till försök och rapporter som visar hur pyrolystemperaturer omkring minst 500 °C tenderar att avlägsna, det vill säga att de går ut i pyrolysgasen, eller bryta ner majoriteten av i synnerhet organiska föroreningar i avloppsslam (Chiari et al. 2024). Koncentrationen av de ämnen som ej avlägsnas i pyrolysen ökar i slutprodukten.

Pyrolysprocesser har rapporterats kunna eliminera över 90 % av PFOS och PFOA från avloppsslam (Chiari et al. 2024). Teknikleverantören AquaGreen anger att pyrolys vid 650 °C i minst 10 minuter följt av förbränning av rökgasen eliminerade de sju PFAS-ämnen som fanns i ingående slam (Wieth 2024, pers.kom.). Ytterligare en teknikleverantör, Pyreg, anger att pyrolys i 600 °C i 10 minuter följt av rökgasförbränning i 850 °C ”eliminerar PFAS från avloppsslam” (egen översättning) (Pyreg 2023). Sørmo et al. (2023) anger att pyrolys är en lovande metod för att minska mängden PFAS i avloppsslam, med hög reduktion, och inkluderar massbalanser över 56 olika PFAS-ämnen som belyser fördelningen av kvarvarande PFAS i biokol och utsläpp. Dock kvarstår osäkerheter kring termiska nedbrytningsprodukter i rökgaser.

Enligt Baresel et al. (2022) är pyrolys en möjlig metod för att destruera PFAS men

de anger att processparametrarna delvis är oklara och vissa resultat går emot de som finns hos Chiari et al. (2024). De återger hur upphettning av slam till 650 °C enligt Kim Lazcano et al. (2019) inte varit effektivt för borttagning av PFAA (inkluderar bland annat PFOS och PFOA). Men också att man efter slampyrolys i kommersiell anläggning (maxtemperatur ca 650 °C, 19 min) inte längre kunde detektera något av de 21 olika PFAS som fanns i ingående slam (Thoma et al. 2022). Det är viktigt att vara medveten om risken att kortare PFAS kan bildas som nedbrytningsprodukt, vilket åtminstone rapporterats i fallet förbränning och pyrolys av kontaminerad jord (Baresel et al. 2022). För att säkerställa fullständig destruktion (åtminstone till under detektionsgräns) och kontroll av nedbrytningsprodukter bör analyser därför omfatta inte bara de ursprungliga PFAS-föreningarna utan också en bredspektrumanalys av potentiella biprodukter. Enligt representant för AquaGreen utför man nya tester med syfte att fylla dessa kunskapsluckor (Wieth 2024, pers.kom.).

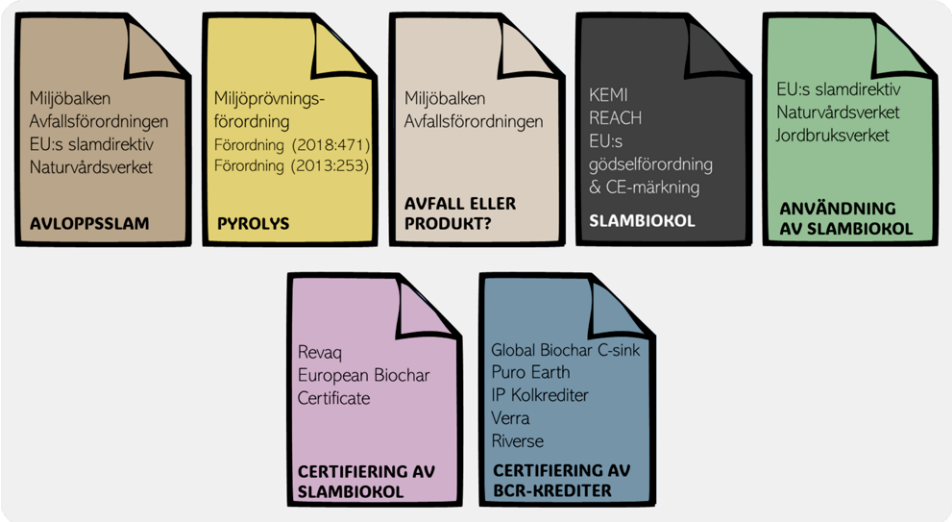
Det innebär att rapporter om PFAS-avskiljning genom pyrolys som exempelvis den från Keller et al. (2024) där man konstaterar att ”För de PFAS som analyserades och upptäcktes i slammet var avlägsnandet 100 %, utan påvisbara koncentrationer” (egen översättning) blir svår att värdera. Baresel et al. (2022) uppskattar att det krävs temperaturer på minst 900 °C för att bryta ner PFAS, vilket ofta uppnås under pyrolysens andra steg; förbränning av pyrolysgasen. Vidare behövs en utökad förståelse för huruvida det uppstår skillnader mellan aeroba och anaeroba förhållanden, det vill säga förbränning respektive pyrolys. Tabell 3.3 sammanfattar resultaten.

Föroreningar som kan avgå	Temperatur (°C)	Uppehållstid (min)
Läkemedel, hormonstörande ämnen	>500	>3
PFAS (blandade resultat)	>650	>3
PAH, PCB	>400	”Långsam pyrolys”
Mikroplaster	>500	>1

Tabell 3.3
Uppgifter om vilka föroreningar som kan avgå i pyrolys, under vilka temperaturer och uppehållstider (Chiari et al. 2024).

4 Regelverk och certifieringar

I detta avsnitt berör vi regelverk och frivilliga certifieringar som vi i nuläget bedömer som relevanta för processen för pyrolys av avloppsslam. Med tanke på att pyrolys är en ny metod för hantering av avloppsslam i Sverige saknas regelverk specifikt för slambiokol med få undantag, varför de regelverk som redogörs för i rapporten pekas ut genom dess anknytning till avloppsslam eller biokol i kombination med i vad som är relevant för VA-organisationer. Urvalen av regelverk har gjorts i samråd med berörda myndigheter (Bose 2024, pers.kom.; Eskilsson 2024, pers.kom.; Diurlin 2024, pers.kom.) och listas i Figur 4.1.



Figur 4.1
Regelverk och frivilliga certifieringar som bedöms vara relevanta vid pyrolys av avloppsslam.

Den uppmärksamma noterar att vissa regelverk eller myndigheter nämns flera gånger eftersom de påverkar flera delar av processen för pyrolys av avloppsslam. Vi ser det som sannolikt att regelverket kommer att anpassas för slambiokol i samband med att såväl produktion som användning utvecklas. För att inkludera bredden av olika ekonomiska och tekniska förutsättningar för olika VA-organisationer finns fördelar i att driva utvecklingen som ett samarbete inom VA-branschen. Detta kapitel ska därmed ses som en vägledning och introduktion till de huvudsakliga regelverk som för närvarande bedöms relevanta för pyrolys av avloppsslam.

4.1 Avloppsslam som ingångsmaterial

Nedan beskrivs regelverk och kravställande organ som berör hantering och behandling av avloppsslam med utgångspunkt från dess användning som ingående material för pyrolys.

4.1.1 Miljöbalken och avfallsförordning

Miljöbalken (1998:808) innehåller bestämmelser som syftar till att skydda, vårda och bevara människors hälsa, miljö, natur- och kulturmiljöer, biologisk mångfald, mark, vatten och fysisk miljö samt främja återanvändning och återvinning. Exempel på kapitel som berör hantering av avloppsslam är *Kapitel 2 – Allmänna hänsynsregler*, *Kapitel 9 – Miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd*, *Kapitel 15 – Avfall och producentansvar* samt *Kapitel 26 – Tillsyn* (Miljöbalken 1998:808).

Inom EU definieras avfall som ”varje föremål, ämne eller substans som ingår i en

avfallskategori och som innehavaren gör sig av med, eller avser, eller är skyldig att göra sig av med" (Europaparlamentet 2006). Därmed anses inte avloppsslam som är under behandling inom avloppsreningsverket utgöra ett avfall. Avloppsslam, när det är färdigbehandlat i ett reningsverk och transporteras bort, till exempel för att pyrolyseras av annan aktör, regleras dock av avfallsförordningen (2020:614) och listas däri med avfallskod 19 08 05 *Slam från behandling av hushållsavloppsvatten* och 19 06 04 *Rötrest från anaerob behandling av kommunalt avfall* (Klimat- och näringslivsdepartementet 2020:614). I avsnitt 4.3.1 belyser vi synen på slambiokol som avfall eller produkt.

4.1.2 EU:s slamdirektiv

EU:s slamdirektiv reglerar främst användning av avloppsslam, men indirekt ställs även krav på hantering (Europaparlamentet 1986). Direktivet beskriver till exempel att avloppsslam ska behandlas för att reducera hälsorisker samt kontrolleras och dokumenteras innan spridning. EU:s slamdirektiv är från 1986 och i många hänseenden utdaterat (RISE 2023). En process pågår för att avgöra om slamdirektivet ska ses över och Naturvårdsverket förutspår att en ny uppdatering ska komma, som de bland annat förutspår kommer inkludera riktlinjer för PFAS (Bose 2024, pers.kom.). Det bör dock påpekas att även om ett eventuellt nytt regelverk skulle komma med gränsvärden för föroreningar i avloppsslam, är det inte säkert att gränsvärden utgör en utmaning för svenska avloppsreningsverk att uppnå.

4.1.3 Naturvårdsverket

Det är främst tre förordningar som reglerar användning, men även hantering av avloppsslam i Sverige.

1. *SNFS 1994:2 Skydd för miljö och mark när avlopp används i jordbruk* ställer bland annat krav på slamproducenten att föra register över slamanvändare och att provtagning på slammet ska genomföras (Naturvårdsverket 1994:2).
2. *SNFS 1998:944 Hantering av kemiska produkter* innehåller gränsvärden för metaller i avloppsslam för att godkänna användning för jordbruksändamål (Naturvårdsverket 1998:944). Med tanke på att avloppsslam klassas som avfall kan det vara förvirrande att det även regleras i regelverk benämnt "kemiska produkter", men detta förklaras av att benämningen kemisk produkt inte användes på samma sätt inom svenskt rättsväsende och EU när regelverket infördes (Bose 2024, pers. kom.).
3. *SFS 1998:899 Miljöfarlig verksamhet* ställer krav på avloppsreningsverkets verksamhet och även hur och var spridning av slam får utföras (Naturvårdsverket 1998:899).

4.2 Pyrolys av avloppsslam

För att avgöra vilka regelverk som berör tekniken för pyrolys av avloppsslam samt om den är anmälningspliktig eller tillståndspliktig behöver man bestämma vilken typ av anläggning tekniken är, vilket bland annat kan bero av hur det ingående materialet klassas (Klimat- och näringslivsdepartementet 2013:251) och eventuellt även påverkas av i vilket syfte som tekniken primärt är tänkt att användas. Eftersom en pyrolysanläggning kan ses som en kombination av flera tekniker finns i alla fall teoretiskt sett flera alternativ: slambehandlingssteg, förbränningsanläggning, gasproducerande anläggning, avfallsförbränningsanläggning och samförbränningsanläggning.

Miljöprövningsförordningen (2013:251) listar kriterier för olika typer av anläggningar och hänvisar vidare till andra förordningar där det är relevant, och om vi inledningsvis ser över alternativet förbränningsanläggning så är merparten av svenska pyrolysanläggningar för biokolproduktion klassade som förbränningspannor. Tillsynsmyndigheterna

har gjort bedömningen att biokolpannorna inte skiljer sig avsevärt från förbränningspannor i de fall de matas med bränslen som utgörs av vanliga biomassor för biokolproduktion såsom träflis, grenar och toppar (GROT) samt park- och trädgårdsris. Miljöprövningsförordning (2013:251) baserar anmälnings- respektive tillståndsplikt på energiinnehållet i det bränsle som matas in i pyrolysprocessen, vilket därmed kan ge olika bedömning av pyrolysanläggningar med olika kapacitet. I pyrolysanläggningen genereras en gas som förbränns i processen. Den energi som finns i pyrolysgasen jämfört med energin i ingående bränsle är mindre, varför en annan klassning skulle kunna vara möjlig om man ser det inledande pyrolyssteget som ett slambehandlingssteg och att enbart gasförbränningen utgör förbränningspanna. Denna bedömning har gjorts i Danmark (Wieth 2024, pers.kom.). I och med detta finns även möjligheten att bedöma pyrolystekniken som en gasproducerande anläggning enligt miljöprövningsförordning (2013:251). I förordning (2018:471) om medelstora förbränningsanläggningar (2018:471) regleras försiktighetsmått för medelstora förbränningsanläggningar och utsläpp till luft.

Ett resonemang huruvida slambiokol är ett avfall eller ej görs i avsnitt 4.3.1 och samma tillvägagångssätt appliceras på avloppsslam i avsnitt 4.1.1. Det finns, med grund i EU:s definition av avfall, en tydlig grund för att avloppsslam inte är ett avfall i anknytning till pyrolysprocessen om pyrolysen sker som en integrerad del i avloppsreningsverkets slamhanteringsprocess. Det vill säga, så länge avloppsslammet är kvar inom samma anläggning är slammet, enligt EU:s definition, inte ett avfall. Det tillämpades när Roslagsvatten AB införde pyrolys som slambehandlingsmetod på ett befintligt avloppsreningsverk. Som föregångare inom slampyrolys i Sverige kan även Roslagsvattens kommande tillståndsprövning gällande en utökning av kapaciteten inom samma verksamhet sannolikt bli vägledande för framtida VA-organisationer med planer på pyrolys.

När verksamhetsutövaren avser att göra sig av med eller är skyldig att göra sig av med ett avloppsslam klassas slammet som ett avfall. Detta kan vara aktuellt om en aktör, exempelvis ett energibolag, tar emot slam från en annan aktör och använder som energikälla i sin anläggning. Då har den första aktören velat göra sig av med slammet, vilket gör att det då klassas som ett avfall. När ett avloppsslam klassas som ett avfall kan förordningen (2013:253) om förbränning av avfall vara aktuell, nedan kallad FFA. FFA inkluderar pyrolys inom en möjlig teknik för avfallsförbränning, men lyfter att förordningen inte ska tillämpas på pyrolysanläggningar om gaserna från pyrolysen renas i sådan omfattning att de inte medför större utsläpp när de förbränns än för naturgas. Länsstyrelsen i Västerbotten bedömde Swooshs och Umeå Energis tidigare planerade pyrolysanläggning för avloppsslam, som lämnat avloppsreningsverk, där man hänvisar till miljöprövningsförordning (2013:251) bedömde anläggning som en avfallsförbränningsanläggning (Länsstyrelsen Västerbotten 2022). Umeå Energis planer på pyrolys lades dock ned(Svenskt Vatten 2024d). Om det huvudsakliga syftet med pyrolysen är att producera energi eller material från ett avfall eller värmebehandlas i syfte att kunna bortförskaffas kan anläggningen klassas som en samförbränningsanläggning, vilken även den regleras av FFA (2013:253).

4.3 Slambiokol

I detta avsnitt presenteras de regelverk som bedöms vara relevanta för slambiokol. För att förstå vilka regelverk som är tillämpliga inleds avsnittet med en genomgång av bedömningen om slambiokol ska klassificeras som ett avfall eller en produkt, eftersom denna klassificering har stor betydelse för vilka lagkrav som gäller.

4.3.1 Avfall eller produkt?

Beroende på om slambiokol klassas som ett avfall eller en produkt tillämpas olika lagstiftning: avfallslagstiftning eller kemikalielagstiftning (Kemikalieinspektionen 2024a).

Vad som klassas som avfall listas i bilaga 3 i avfallsförordningen (2020:614), men av förklarliga skäl finns slambiokol inte med. Däremot listas bland annat *10 Avfall från termiska processer* och *19 Avfall från avfallshanteringsanläggningar, externa avloppsreningsverk och framställning av dricksvatten eller vatten för industriändamål*, under vilken man hittar *19 01 Avfall från förbränning eller pyrolys av avfall*.

Inom begreppet *produkt* innefattas ämne, blandning, föremål och vara (Naturvårdsverket 2024b). Enligt Kemikalieinspektionen (2024a) och Naturvårdsverket (2024b) är det verksamhetsutövaren som kontinuerligt i sin verksamhet ska bedöma om ett avfall återvunnits till en produkt eller om en produkt blivit till ett avfall. Bedömningen ska göras utifrån en av tre kriteriegrupper enligt Figur 4.2. Sverige saknar nationella kriterier, men behovet av att upprätta egna har utretts (Naturvårdsverket, 2021). Valet står därmed mellan miljöbalkens generella kriterier och EU:s End-of-waste. End-of-waste-kriterier finns specificerade för vissa avfallstyper, men överensstämmer i stort med miljöbalkens generella (Naturvårdsverket 2024b).

Figur 4.2
Kriterier vid bedömning av huruvida avfall övergår till produkt utifrån information från Naturvårdsverket (2024b).

Den grupp kriterier som benämns ”miljöbalkens generella” i figuren ovan har sitt ursprung i EU:s avfallsförordning (Europaparlamentet 2008).

Avfall som har genomgått ett återvinningsförfarande upphör att vara avfall om:
1. ämnet eller föremålet ska användas för ett visst ändamål
2. det finns en marknad för eller efterfrågan på sådana ämnen eller föremål
3. ämnet eller föremålet uppfyller tillämpliga krav i lag och annan författning
4. användningen av ämnet eller föremålet inte leder till allmänt negativa följder för människors hälsa eller miljön (Naturvårdsverket 2024b).

Då Roslagsvatten kommer att vara den första producenten av slambiokol i Sverige har en bedömning av huruvida det är ett avfall eller en produkt oss veterligen inte gjorts tidigare. Naturvårdsverket är tydliga med att en slutlig bedömning ligger på tillsynsmyndigheten (Bose 2024, pers.kom.). Detta är ett vägval och arbete som VA-branschen skulle dra nytta av att utvärdera gemensamt. När frågan diskuteras under projektmöten lyfts åsikten om att en produktklassning är att föredra för användaren, men inte nödvändigtvis för VA-organisationen som åläggs arbetet att anamma en ny lagstiftning och anknuten administration. Ur användarens perspektiv finns ett stort värde i att ansvaret ligger på VA-organisationen, särskilt med tanke på att kunskapsläget om slambiokol fortfarande är begränsat. Det finns en samsyn att om slambiokol ska ses som en produkt så är det VA-organisationen som måste ta produktansvaret eftersom slambiokolets påverkas i hög grad av s.k. uppströmsarbete för att minska föroreningarna i det ursprungliga avloppsslammet.

Naturvårdsverket menar att bedömningen av om avloppsslam (orötat eller rötat) som sprids på åkermark utgör ett avfall eller en produkt även måste göras i varje enskilt fall,

men att Naturvårdsverket (Bose 2024, pers.kom.) och utredningen Hållbar slamhantering (SOU 2020:3) har kommunicerat att avloppsslam ses som ett avfall. Motiveringen är att kriterium nr 2 ovan inte uppfylls eftersom VA-organisationerna har en kostnad för att bli av med slammet och därmed överlämnas det inte på fördelaktiga grunder (Bose 2024, pers.kom.). Samtidigt skulle man kunna motivera att kriteriet uppfylls eftersom det finns en efterfrågan på slam även om det saknas betalningsvilja. Enligt Naturvårdsverket uppfylls däremot kriterium 4 om avsaknad av allmänt negativa följder på hälsa och miljö, men detta är komplext och behöver utredas mer till exempel med tanke på PFAS (Bose 2024, pers.kom.). Bedömer vi kriterierna efter slambiokol blir marknadskriteriet avgörande. Medför kvittblivningen av slambiokol en kostnad skulle det kunna klassas som ett avfall, men i det fall en marknad etableras skulle en sådan bedömning behöva göras om. I Danmark klassas slambiokol i dag som ett avfall (EBC 2023).

Om slambiokol klassas som ett avfall, likt avloppsslam, kan befintligt regelverk för avloppsslam avseende spridning appliceras med vissa modifikationer, vilka redogörs för längre fram. Skulle slambiokol däremot klassas som en produkt aktiveras andra regelverk, däribland krav på registrering hos Kemikalieinspektionen samt REACH, vilka beskrivs nedan. Produktansvarslagen specificerar förutsättningar för skadestånd som orsakats av produkten (Justitiedepartementet 1992), och ett förslag på nytt direktiv avseende produktansvar är under beredning (Regeringskansliet 2022). Produktsäkerhetslagen reglerar bland annat näringsidkarens skyldigheter avseende produktens säkerhet (Finansdepartementet KO 2004).

4.3.2 Kemikalieinspektionen

Kemikalieinspektionen (KEMI) är en svensk myndighet som ansvarar för tillsynen av kemikalielagstiftning och säker hantering av kemikalier i Sverige (Kemikalieinspektionen 2023). En central del av deras arbete är produktregistret, där företag som tillverkar eller importerar kemiska produkter i större mängder är skyldiga att registrera dessa för att säkerställa att information om farliga ämnen finns tillgänglig och att kemikalier hanteras på ett säkert sätt.

Erik Diurlin på Kemikalieinspektionen (2024, pers.kom.) redogör för att det som avgör om en produkt är klassad som en kemisk produkt eller bioteknisk organism är att varuslaget finns deklarerat i *förordning (2008:245) om kemiska produkter och biotekniska organismer*. Här finns inte några typer av slam, vilket innebär att avloppsslam inte är anmälningspliktig hos KEMI. Med nummer 2803 hittar vi dock *Kol (kimrök och andra former av kol, inte nämnda eller inbegripna någon annanstans i denna bilaga),* vilket möjligen gör slambiokol anmälningspliktigt som en kemikalie (Regeringskansliet 2008).

Jenny Virdarson på Kemikalieinspektionen (2024, pers.kom.) påminner om att bedömningen av om slambiokol är ett avfall eller en kemikalie görs av verksamhetsutövaren och att det finns flera aspekter som bör påverka bedömningen. Erik Diurlin (2024, pers.kom.) tillägger att huruvida slambiokol ska ses som en kemikalie eller inte påverkas av vilket nummer enligt tulltaxan som Tullverket bedömer att slambiokol ska ha. Under samtal med Tullverket där vi redogjorde för grunderna kring slambiokol gjorde Tullverket en primär bedömning att det borde inkluderas under 3825 10 Kommunalt avfall (Tullverket 2024, pers.kom.), vilket innebär att det inte klassas som kemikalie. EcoTopic har i ett tidigare uppdrag dock genomfört registrering av en tysk produkt med slambiokol, vilken då fick nummer 3103 90 Andra fosforgödselmedel som inte är superfosfater, vilket innebär anmälningsplikt som kemikalie (Regeringskansliet 2008). Utifrån de olika bedömningarna är det tydligt att det finns ett fönster här för potentiella slambiokolsproducenter att bestämma vilket vägval avseende klassning man vill göra och därefter motivera detta mot Tullverket. Finns det inte något nummer som passar kan man ansöka om ett bindande klassificeringsbesked, så kallad BKB, vilket då ger ett nummer som är giltigt under 3 år. Beslutet går dock att överklaga (Tullverket 2024).

4.3.3 REACH

REACH (Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals) är en omfattande EU-lagstiftning som syftar till att säkerställa en hög skyddsnivå för människors hälsa och miljön genom att reglera användningen av kemikalier. Lagen kräver att företag registrerar och utvärderar de kemikalier de tillverkar eller importerar inom EU, vilket främjar säker hantering och minskad användning av farliga ämnen. Genom REACH ökar transparensen om kemikaliernas effekter, vilket bidrar till att skydda både konsumenter och ekosystem från potentiella risker (Kemikalieinspektionen 2024c).

REACH delar upp kemikalier i olika akter (eng./fr. dossier). Det finns sedan tidigare en akt för träkol där den europeiska kemikaliemyndigheten, ECHA, motiverar hur träkol är en kemikalie med ”Charcoal obtained by thermal decomposition of wood is not regarded as a substance which occurs in nature and therefore it is not covered by this exemption.” (ECHA 2012). Naturvårdsverket förtydligar att även om träkol förekommer naturligt i naturen är det träkol som avses inte utvunnet ur naturen utan framställt av människor (Bose 2024, pers.kom.). Biochar Europe, tidigare European Biochar Industry (EBI), har arbetat för att få biokol inkluderat inom samma akt som träkol för att undvika de omfattande kostnader som skapandet av en ny akt för endast biokol skulle medföra (European Biochar Industry Consortium 2020). Slambiokol har inte kunnat inkluderas i denna akt på grund av de påtagliga skillnaderna mellan slambiokol och biokol, som till exempel kolhalt. Lägsta godkända kolhalt har dock nyligen sänkts till 30 %, vilket potentiellt skulle kunna inkludera vissa slambiokol (Coalster 2023). För ett eventuellt godkännande av akten krävs analyser samt en bedömning av materialet med hänseende till kemisk säkerhet och övriga risker (Schwantner 2024, pers.kom.).

4.3.4 EU:s gödselförordning och CE-märkning

CE-märkning utgör ett intyg för att EU:s grundläggande hälso-, miljö- och säkerhetskrav är uppfyllda för en specifik produkt. CE-märkning är obligatoriskt för vissa produktsegment, men valfritt för övriga (Svenska Institutet för Standarder 2024). EU:s gödselförordning (EU Fertilising Products Regulation, FPR) listar de typer av gödselmedel som ska CE-märkas och därmed inkluderas inom begreppet EU-gödselprodukter. Gödselprodukter omfattar organiska och oorganiska gödselmedel samt andra produktfunktionskategorier som kalkningsmedel, jordförbättringsmedel, odlingssubstrat, hämmare och växtbiostimulanter (Kemikalieinspektionen 2024b). EU:s gödselförordning inkluderar biokol, beskrivet som *Pyrolysis and gasification materials*, men avloppsslam undantas som godkänt pyrolysmaterial varför slambiokol inte är inkluderat. Produkter från förbränning, kallat *Thermal oxidation materials or derivatives*, godkänner däremot avloppsslam som ingående material (Europaparlamentet 2019).

4.4 Användning av slambiokol

Nedan redovisas de regelverk som kan vara relevanta för användning och spridning av slambiokol. Det är dock viktigt att återigen understryka att specifika regelverk för slambiokol ännu inte finns. Naturvårdsverket hänvisar därför i dessa fall till den befintliga lagstiftningen som reglerar hantering och användning av avloppsslam (Bose 2024, pers. kom.; Eskilsson 2024, pers.kom.).

4.4.1 EU:s slamdirektiv

EU:s slamdirektiv (Europaparlamentet 1986) syftar till att reglera användningen av avloppsslam inom jordbruk. Förordningen är dock förlegad (Svenskt Vatten 2022), varför EU tagit fram underlag till EU-kommissionen för att fatta beslut om den ska revideras (RISE 2023). Enligt Naturvårdsverket är det angeläget att slamdirektivet uppdateras med gränsvärden för bland annat PFAS. Naturvårdsverket och även Danmark har själva

börjat se över eventuella gränsvärden om revideringen från EU dröjer allt för länge. Då slamdirektivet reglerar hur avloppsslammet ska hanteras har rekommendationen till revidering även berört slambehandlingstekniker. Naturvårdsverket menar att det finns en möjlighet att det uppdaterade slamdirektivet kan inkludera krav på vissa tekniker, såsom pyrolys (Bose 2024, pers.kom.).

4.4.2 Naturvårdsverket

SNFS 1994:2 Skydd för miljö och mark när avlopp används i jordbruk reglerar användningen av avloppsslam i jordbruket för att skydda miljön och markens hälsa. Föreskrifterna anger gränsvärden för tungmetaller och andra föroreningar i slammet som kan spridas på åkermark. Förordningen innehåller också riktlinjer för att säkerställa att näringsämnen i slammet nyttjas på ett säkert sätt, utan att skada markkvalitet eller vattendrag (Naturvårdsverket 1994:2).

SNFS 1998:944 Hantering av kemiska produkter innehåller gränsvärden för metaller i avloppsslam för att godkänna användning för jordbruksändamål (Naturvårdsverket 1998:944). I skrivande stund finns en promemoria avseende *Ändrade krav på rapportering och registerhållning av uppgifter om användning av avloppsslam i jordbruket* där Naturvårdsverket föreslås upprätta ett register över var avloppsslam sprids på jordbruksmark i Sverige och göra denna information tillgänglig för allmänheten (Klimat- och näringslivsdepartementet 2024). Naturvårdsverket bedömer att denna regeländring även skulle omfatta slambiokol (Bose 2024, pers.kom.).

Utredningen Hållbar slamhantering (SOU 2020:3) nämner att vid ett eventuellt förbud mot spridning av avloppsslam krävs kompletterande reglering som möjliggör spridning av till exempel slambiokol.

4.4.3 Jordbruksverket

Jordbruksverkets förordning *SJVFS 2004:62 Föreskrifter om miljöhänsyn i jordbruket vad avser växtnäring* föreskriver hur miljöhänsyn ska tas inom jordbruket när det gäller användningen av växtnäring (Jordbruksverket 2004). Föreskriften utvecklades ursprungligen för stallgödsel men kompletterades för att omfatta alla typer av organiska gödselmedel, vilket inkluderar avloppsslam potentiellt även slambiokol (Eskilsson 2024, pers.kom.). Förordningen reglerar godkända gödselmängder som får spridas på åkermark och vilka försiktighetsåtgärder som ska vidtas för att minimera risken för förorening av mark och vattendrag. Förordningen anger en begränsning för fosforgiva under en 5-årsperiod om maximal 22 kg tillförd totalfosfor per hektar och år, men gör ingen skillnad på fosforns växttillgänglighet eller hur mycket fosfor som bortförs i växtlighet vid skörd (Eskilsson 2024, pers.kom.). Förordningen innehåller även en hänvisning till ovan nämnda SNFS 1994:2 för ytterligare bestämmelser om avloppsslam.

Jordbruksverket har sammanställt de krav och gränsvärden som fastställs i olika gällande förordningar för spridning av avloppsslam på jordbruksmark (Jordbruksverket 2021). Dessa krav reglerar exempelvis på vilka arealer och för vilka grödor som avloppsslam får spridas. Gränsvärden, som presenteras i Tabell 4.1, är av stor betydelse eftersom de kan påverka både möjligheten att använda slambiokol och de mängder som får spridas förutsatt att dessa tillämpas för slambiokol på samma sätt som för avloppsslam. Analyser krävs på ett slambiokols metall- och fosforinnehåll för att beräkningar ska kunna göras om spridbar mängd. Utdrag på tungmetallinnehåll i slambiokol från litteraturen har gjorts i avsnitt 3.1.7. Tabellen inkluderar högsta tillåtna metallhalt i avloppsslam för spridning på jordbruksmark (SFS 1998:944), högsta tillåtna tillförsel av metaller till jordbruksmark vid spridning av avloppsslam (SNFS 1994:2, bilaga C) (Jordbruksverket 2021) och högsta tillåtna metallhalt i marken för att få använda avloppsslam (SNFS 1994:2, bilaga B).

Metall	Gränsvärden för innehåll av metaller i avloppsslam för spridning på åkermark (mg/kg torrsubstans)	Gränsvärden för den årliga mängden metaller som högst får tillföras åkermark vid användning av avloppsslam (g/ha/år) (genomsnitt för en 7-årsperiod)	Gränsvärden för halten av metaller i åkermark vid användning av avloppsslam (mg/kg torrsubstans) (jord)
Bly	100	25	40
Kadmium	2	0,75	0,4
Koppar	600	300	40
Krom	100	40	60
Kvicksilver	2,5	1,5	0,3
Nickel	50	25	30
Zink	800	600	100

Tabell 4.1
Gränsvärden för användning av avloppsslam på jordbruksmark enligt svenska regler och riktlinjer.

Jordbruksverket gör en initial bedömning att befintligt regelverk som reglerar spridning av avloppsslam på åkermark även skulle kunna appliceras för slambiokol, vilket innebär att man utgår från hur mycket tungmetaller det är i själva slambiokolet mätt i mg/kg torrsubstans (Eskilsson 2024, pers.kom.). Klarar slambiokolet kraven kan man sedan beräkna vilken mängd slambiokol som får tillföras per hektar baserat på den parameter som är begränsande. Slutligen finns även gränsvärden för godkänd halt av tungmetaller i jorden för att tillåta spridning av avloppsslam på den specifika åkermarken. Om tungmetaller binds hårdare i slambiokol, vilket forskningen indikerar, kan halten ackumuleras i jorden vilket gör att gränsvärden för halten av metaller i jord kan bli begränsande för spridning av slambiokol på denna åkermark.

Baserat på Naturvårdsverkets genomsnittliga värden för tungmetaller i svenskt avloppsslam som sprids på åkermark från år 2022 har en omräkning gjorts för att uppskatta teoretiska tungmetallhalter i slambiokol. Märk väl att beräkningen bygger på antaganden om att inga tungmetaller avgår under pyrolysen samt en omvandlingsfaktor på 42 % från torrsubstans (TS) i avloppsslam till torrsubstans i slambiokol, enligt uppgifter från teknikleverantören AquaGreen för representativt, orötat, danskt avloppsslam (Wieth 2024, pers.kom.). Resultaten presenteras i Tabell 4.2 och visar att baserat på dessa antaganden och värden skulle slambiokol inte klara gränsvärden för koppar och zink för att tillåta spridning på åkermark (Jordbruksverket 2021) förutsatt att Naturvårdsverkets initiala bedömning att befintligt regelverk för avloppsslam ska gälla även för slambiokol står fast (se avsnitt 4.4). Resultatet i tabellen säger dock ingenting om specifika slambiokol från svenska avloppsreningsverk, men det belyser ett potentiellt problem som kan behöva hanteras för att möjliggöra bred användning av slambiokol inom svenskt jordbruk.

Tabell 4.2
Uppskattning av vad ett slambiokol i genomsnitt kan komma att innehålla avseende tungmetaller. Rödmarkerade siffror överskrider svenska gränsvärden för slamspridning på jordbruksmark som visas i Tabell 4.1 (SFS 1998:944) och bedöms vara gällande även för slambiokol.

Ämne	Tungmetaller i slam, genomsnitt (mg/kg TS) (Naturvårdsverket, 2023a)	Beräknat innehåll av tungmetaller i slambiokol (mg/kg TS)
Kadmium	0,606	1,4
Koppar	334	795
Nickel	16,8	40
Bly	13,72	32
Zink	470	1 119
Kvicksilver	0,341	0,8
Krom	19,78	47

4.5 Frivilliga certifieringar

Nedan ges en introduktion till två certifieringsstandarder som är relevanta, men frivilliga, för slambiokol.

4.5.1 Revaq

Revaq är ett frivilligt certifieringssystem för reningsverk i Sverige som syftar till att förbättra kvaliteten på avloppsslam som används som gödningsmedel i jordbruket (Revaq 2024). Systemet infördes för att säkerställa att avloppsslammet uppfyller strikta miljökrav och är säkert att sprida på åkermark. Genom att följa Revaq-certifieringens riktlinjer arbetar reningsverken kontinuerligt med att minska förekomsten av oönskade ämnen i avloppsslammet och samtidigt bidra till att öka spårbarheten och transparensen kring slamhantering. Initiativet har fått stöd av både myndigheter och jordbrukssektorn för att främja hållbar återföring av näringsämnen till kretsloppet (Svenskt Vatten 2024e; Revaq 2024). Begreppet slamkol, som det benämns av Revaq, innefattar både slambiokol och HTC-kol, även kallat hydrokol, och inkluderades i certifieringen år 2024 (Revaq 2024). HTC-kol eller hydrokol produceras genom processen hydrotermisk karbonisering.

Enligt Revaqs standard måste slamkol analyseras med avseende på PAH-innehåll (Revaq 2025). Den sammanlagda halten av ett urval av 16 PAH-föreningar får inte överstiga 4 mg/kg TS. Övriga analyser, som till exempel halter av tungmetaller, görs på det ingående avloppsslammet. Om avloppsslammet uppfyller certifieringens riktlinjer och ovanstående riktvärde för slambiokolets PAH-innehåll uppfylls kan slambiokolet spridas på jordbruksmark enligt Revaq.

Från och med 2025-01-01 inkluderar Revaqs senaste uppdatering även riktvärden för PFAS4 och PFAS22 i avloppsslammet och krav på handlingsplan om riktvärden överskrids. Eftersom det i dagsläget saknas regelverk för slambiokol i Sverige i kombination med att Revaq är en etablerad standard finns fördelar och möjligheter med att framtida regelverk för slambiokol anammar Revaqs metodologi.

4.5.2 European Biochar Certificate

Den europeiska certifieringen för biokol *European Biochar Certificate* (EBC) är utvecklad av Ithaka Institute, ägs av Carbon Standards International (CSI) och verifieras av Certification of Environmental Standards (Ceres) (Certification of Environmental Standards 2024; EBC 2023).

EBC ställer krav på såväl produktionsprocess som utgående produkter. Avseende krav på pyrolysprocessen utgår EBC från en lista över godkända ingående material, så kallad *positive list* till vilken avloppsslam inkluderades år 2022 (EBC 2022). EBC ställer även krav på att pyrolysprocessen är effektiv med hänsyn till förbrukning av energi och grundämnet kol. Dessutom måste pyrolysgasen förbrännas och användas för att inte orsaka utsläpp av andra växthusgaser än koldioxid (EBC 2023). Allt detta måste bevisas genom dokumentation och analyser som granskas under certifieringsprocessen. Med erfarenhet av att ha certifierat ett antal biokolproducenter bedömer vi att kostnaden för certifieringen varierar kraftigt eftersom vissa aktörer som är inblandade i certifieringsprocessen tar betalt beroende på hur mycket tid de lägger ned i kombination med fasta kostnader. Det är inte heller ovanligt att certifieringsprocessen tar 6–12 månader.

Varje godkänt material på *positive list*, i kombination med analys av utgående produkt, kopplas dessutom till en kategori för godkända användningsområden. Kategorierna är FeedPlus, Feed, Agro Organic, Agro, Urban, ConsumerMaterials och BasicMaterials (EBC 2023). För varje kategori listas även gränsvärden för föroreningar. Slambiokol tillåts i dagsläget endast inom kategorin BasicMaterials, vilket innebär inblandning i material, till exempel betong eller asfalt. EBC flaggar dock för att man kan ansöka om undantag från tilldelad kategori med motivering om att annan användning, som till exempel spridning på åkermark, är tillåtet enligt nationella regelverk. Danmark har

ansökt och fått godkänt för detta undantag och har dessutom en landspecifik bilaga inom standarden som fokuserar på pyrolys av avloppsslam (EBC 2023), vilket skulle kunna komma att bli intressant även för Sverige.

Utöver godkända gränsvärden finns ytterligare ett krav för att slambiokolet ska klassas som en stabil produkt. Kvoten H/C_{org} ger ett mått på slambiokolets stabilitet och enligt EBC ska H/C_{org} vara <0,7 för att få klassas som biokol (EBC 2023).

EBC är den mest anammade certifieringen för biokol globalt. För VA-organisationer som pyrolyserar avloppsslam bedömer vi att behovet av EBC-certifiering beror av vilken bransch som blir huvudsaklig användare av slambiokol. Jämför vi med biokol så har marknaden för urbana jordar anammat EBC-certifiering som ett kvalitetskrav som ställs i upphandlingar. Inom lantbrukssektorn är i stället Revaq väletablerat.

4.6 BCR-krediter

Biochar Carbon Removal (BCR) är benämningen för metoden att minska mängden koldioxid i atmosfären genom produktion och användning av biokol och slambiokol. Tack vare den stabila kolstrukturen i biokol och slambiokol lagras kol, och hindras från att återgå till koldioxid, under 100-tals till 1000-tals år (Carbonfuture 2025). Med BCR-kredit avses ett certifierat, säljbart certifikat som kan knyta en specifik mängd nedlåst kol till en köpare. Köparen kan tillgodoräkna sig den minskade mängden koldioxid, så kallad klimatkompensation.

Nedan beskrivs de organisationer som erbjuder certifiering av BCR-krediter från slambiokol. Vi vill dock påpeka att behovet att certifiera sin kolsänka främst uppstår om dessa ska säljas vidare. Väljer en VA-organisation att själva tillgodoräkna sig BCR-krediterna i sitt eget klimatarbete finns alternativet att beräkna verksamhetens klimatpåverkan med ett av marknadens tillgängliga verktyg. Samtidigt finns det ett värde i tredjepartsgranskning ur ett trovärdighetsperspektiv oavsett val. I kapitel 6 beskriver vi vilka aktörer som är inblandade vid skapandet och certifiering av BCR-krediter, men nedan presenteras specifikt ett urval av certifieringsstandarder.

4.6.1 Global Biochar C-sink

Global Biochar C-sink är en certifiering för kolsänkan från slambiokol, framtagen av EBC (Schmidt et al. 2024). Certifiering enligt Global Biochar C-sink förutsätter certifiering av slambiokolet enligt EBC. Som nämnts tidigare finns dock begränsningar för hur slambiokolet får användas och certifiering av kolsänkan förutsätter godkänd användning. Vid godkänd ansökan om undantag avseende användning är dock EBC-certifiering av såväl slambiokol som kolsänka möjlig i kombination med spridning på jordbruksmark (Pschera 2024, pers.kom.).

För att godkännas som kolsänka enligt EBC måste kvoten H/C_{org} vara <0,4 (Schmidt et al. 2024). I den senaste uppdateringen av standarden har man dessutom gjort ett antagande om att 75 % av kolstrukturen kan liknas vid inertinit (se avsnitt 6.4.3) och därmed vara stabilt i flera tusen år (Schmidt et al. 2024). De 25 % av kolet som anses semi-stabilt i upp till tusen år klassar man inte längre som säljbart som kolkredit. Denna andel kan i stället räknas in i verksamhetens beräkning av årligt klimatavtryck. I standarden skriver man att en mer detaljerad beskrivning av dessa gränser kommer att publiceras i kommande versioner. Detta sätt att kvantifiera kolsänkans storlek skiljer sig från tidigare metod där man utgick från ett 100-årsperspektiv. Studier på hur mycket kol som binds i marken vid spridning av slam visar att kontinuerlig tillförsel av slam påverkar kolhalten i jorden positivt sett på en 100-årsperiod (Börjesson, 2021). Dock är detta kol inte stabilt i jämförelse med slambiokol, vilket medför att när spridningen av slam upphör kommer det tillförda kolet att brytas ned inom en relativt kort period (Kätterer 2024, pers.kom.).

Global Biochar C-sink ställer även kravet att ingående pyrolysmaterial får ha ett maximalt plastinnehåll om 10 % och att det ska upprättas en plan för hur mängderna plast kan minimeras (Worfering 2024, pers.kom.).

Global Biochar C-sink följer även riktlinjer statuerade av ICROA (International Carbon Reduction and Offset Alliance). ICROA är en branschorganisation som arbetar för att säkerställa kvalitet och trovärdighet i marknaden för frivilliga koldioxidkompensationer. Organisationens medlemmar måste följa strikta riktlinjer och standarder för att säkerställa att deras klimatkompensationsprojekt är trovärdiga och levererar verifierbara utsläppsminskningar. ICROA främjar bästa praxis inom kolmarknaderna genom att övervaka, certifiera och validera projekt och åtgärder för koldioxidreduktion. ICROA ställer krav på att koldioxidbindande projekt ska vara mätbara, rapporterbara och verifierbara för att kunna tillgodogöras som giltiga koldioxidkompensationer (ICROA 2024). En direkt effekt som anknytningen till ICROA lett till är kravet på att en PDD (Project Design Document) måste skapas för varje upphovskälla till kolkrediter. Det är ett ingående dokument som beskriver verksamheten i detalj för att skapa tillförlitlighet till kolkreditkällan.

4.6.2 Puro Earth

Puro Earth (Puro) är en global marknadsplats och standard för certifiering av kolsänkor från bland annat slambiokol. Puro använder benämningen CORC (CO_2 Removal Certificate) (Puro.earth 2024d). Puro ställer endast krav på att slambiokolet ska användas i enlighet med nationella regelverk, vilket underlättar för slambiokol jämfört med certifiering enligt EBC (Azzi 2024, pers.kom.). Om det saknas regelverk, vilket är fallet för slambiokol, hänvisar Puro till EBC:s krav och gränsvärden, och om slambiokolet överstiger dessa för önskad applikation vill Puro att man uppvisar analyser på tungmetaller och fosfor samt motiverar varför man vill göra avsteg från EBC (Azzi 2024, pers.kom.). I diskussion med Puro gjorde de en preliminär bedömning av att Naturvårdsverkets hänvisning till att slambiokol kan följa befintligt regelverk för avloppsslam utgör en lovande motivering men att en bedömning görs för varje case (Azzi 2024, pers.kom.). Puro ställer kravet på att kvoten H/C_{org} ska vara <0,7, jämfört med EBC:s 0,4, och beräknar kolsänkans storlek över en 100-årsperiod, men de ser löpande över behov av uppdateringar (Azzi 2024, pers.kom.). Puro tar även hänsyn till i vilken klimatzon slambiokolet används med hänvisning till att nedbrytningshastigheten är långsammare i kallare klimat. Även Puro är anknuten till ICROA och måste därmed förhålla sig till samma regelverk som Global Biochar C-sink (Puro.earth 2024c).

Puro har ännu inte certifierat något slambiokol, men de för diskussioner kring vilka speciella anpassningar som krävs och avser att inkludera dessa i kommande uppdatering av standarden. En aspekt som kan ha betydande påverkan är andelen fossilt kol i slam, som ett resultat av kemikalier och plaster. Fossilt kol får inte räknas in i kolsänkan (Azzi 2024, pers.kom.), och kan i vissa fall utgöra 4–14 % av slambiokolets totala kolhalt (Law et al. 2013), vilket därmed skulle kunna ha en betydande effekt på kolsänkans storlek. Detta krav skiljer sig från gränsen för plastinnehåll inom Global Biochar C-sink, men syftar båda till att enbart räkna med organiskt kol.

4.6.3 IP Kolkrediter

Svenskt sigill är en miljömärkning för svensk mat och svenska blommor med fokus på hållbarhet, djuromsorg och livsmedelssäkerhet. Under organisationen Sigill Kvalitetssystem AB administreras även certifieringar för mer specificerade områden såsom biodling, frukt och grönt och växtodling (Sigill Kvalitetssystem AB 2024a). I juli 2024 lanserades en certifiering för kolsänkor från biokol, kallad IP Kolrediter. IP Kolkrediter godkänner inte slambiokol för certifiering (Sigill Kvalitetssystem AB 2024b). I samtal med Hushållningssällskapet Sjuhärad som har varit initiativtagare till IP Kolkrediter menar de dock att de följer utvecklingen kring slambiokol och är öppna för en ny bedömning i framtiden (Hermansson 2024, pers.kom.).

4.6.4 Riverse

Riverse Standard är en standard som fokuserar på kolkrediter från teknikbaserade projekt i Europa. Riverse startade år 2021 och följer även de kriterier enligt ICROA (Riverse 2024b). Riverse är både en metodologi för att kvantifiera kolkrediter, ett spårningssystem, s.k. MRV, och en handelsplattform för kolkrediter.

Riverse anammar en kombination av både nedbrytningshastighet och inertinit vid kvantifiering av BCR-krediter, men utgår likt EBC och Puro även från att kvoten H/C_{org} ska understiga 0,7. (Riverse 2024a)

4.6.5 Verra

Verra är en global icke-vinstdrivande organisation som utvecklar och hanterar standarder för att certifiera miljömässigt och socialt hållbara projekt, inklusive kolsänkor och biodiversitetsinitiativ (Verra 2024). Verra godkänner kolkrediter från slambiokol men skriver att relevanta regelverk ska följas och anger därefter EBC som exempel (Etter et al. 2023).

5 Marknad för slambiokol

I dag finns ingen etablerad marknad för slambiokol. I samtal med leverantörer av pyrolysteknik för avloppsslam framgår att den lilla mängd som produceras i Sverige och övriga Europa i dag ges bort eller används som bränsle. Det bedöms att uppbyggandet av en marknad för slambiokol kommer att ha olika tidshorisont beroende på användningsområde. Frågan om slambiokolet fortsatt ska klassas som ett avfall likt avloppsslam eller som en produkt där andra regelverk aktiveras kvarstår (läs mer om klassificering som avfall eller produkt i avsnitt 4.3.1). En produkt med anknutet produktansvar signalerar kvalitet och trovärdighet gentemot kunder, vilket bedöms vara en förutsättning för betalningsvilja. Denna betalningsvilja kan dock jämföras med möjligheten att minska kvittblivningskostnaden jämfört med avloppsslam. Med kvittblivningskostnad avses den ersättning som en av VA-organisationen upphandlad aktör begär för att ta emot avloppsslam. Kvittblivningskostnaden varierar över landet bland annat beroende på lantbrukets behov och därmed efterfrågan på avloppsslam som gödselmedel. Nuvärdesanalys av olika affärsscenarier för pyrolys av avloppsslam följer i avsnitt 9.3.

Slambiokolets specifika egenskaper avgör dess lämplighet för olika användningsområden och säger en del om potentialen att konkurrera med befintliga produkter på etablerade marknader eller att skapa helt nya marknader. Men för att bedöma genomförbarhet av en marknadsintroduktion är det viktigt att även förstå de ekonomiska förutsättningarna och attityderna hos relevanta aktörer. Denna sektion belyser ekonomiska förutsättningar; här analyseras kostnader, intäktsmöjligheter och marknadsdynamik för slambiokol. Den undersöker också attityder och förväntningar hos relevanta aktörer; här undersöks hur branschorganisationer, användare och andra intressenter ser på potentialen för slambiokol och hur dessa attityder kan påverka marknadsacceptans och -utveckling. Genom att sammanfoga dessa perspektiv får vi en helhetsbild av hur slambiokol kan integreras i befintliga marknader och vilka faktorer som påverkar dess framtida utveckling och användningsområden.

5.1 Användningsområden

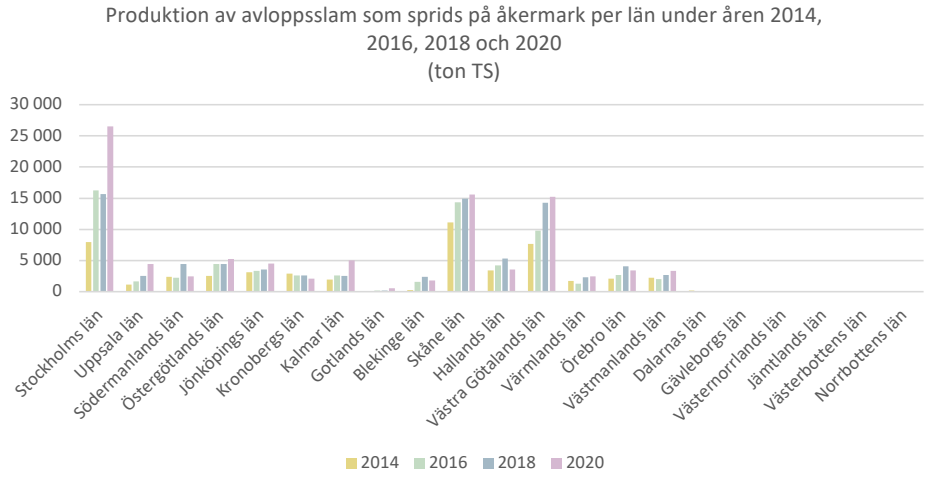
I kapitel 3 gjordes en genomgång av slambiokolets egenskaper följt av en jämförelse med befintliga produkter som har mer eller mindre liknande egenskaper. Slambiokol bedöms ha störst potential att snabbt kunna nå marknaden genom att komplettera eller konkurrera med produkter på redan etablerade marknader. Ju större osäkerhet kring slambiokolets effekt i ett visst system, desto lägre betalningsvilja alternativt större incitament att föregå marknadsintroduktionen med tester, analyser och försök vilket förlänger processen. Jämförelsen mellan slambiokol och befintliga alternativ fokuserade särskilt på slambiokolets potential som jordförbättringsprodukt/gödningsmedel och filter (se Bilaga A), då detta beskrivs som lovande användningsområden för slambiokol enligt befintlig litteratur. I detta avsnitt undersöks dessa användningsområden ur ett marknadsperspektiv för att närmare utvärdera dess potential för marknadsintroduktion.

5.1.1 Gödselmedel på jordbruksmark

Incitamenten för att använda slambiokol på jordbruksmark är främst recirkulering av den växttillgängliga delen av avloppsslammets fosfor och nedlåsning av slambiokolets kol samt minskade organiska föroreningar jämfört med spridning av avloppsslam i enlighet med utredningen Hållbar slamhantering (SOU 2020:3).

Om vi drar liknelser med spridning av avloppsslam på åkermark så är det främst lantbrukare utan djurhållning som sprider avloppsslam eftersom lantbruk med djurhållning

redan får mycket av sitt behov av fosforgödningsmedel tillgodoställt i form av stallgödsel. Produktionen av avloppsslam som sprids på åkermark är starkt koncentrerad till södra Sverige, vilket syns i Figur 5.1 nedan (Statistikdatabasen 2020). Notera att den geografiska fördelningen över var avloppsslammet sprids kan se annorlunda ut.



Figur 5.1
Producerad mängd avloppsslam som sprids på åkermark fördelat på det län där det produceras men ej nödvändigtvis sprids. Produktionen är koncentrerad till södra delarna av Sverige (Statistikdatabasen 2020).

Den stabila kolstrukturen i slambiokol skulle kunna göra det intressant för lantbrukare utöver de som primärt behöver fosfor. Dock utgör den begränsade fosforgivan om i genomsnitt 22 kg per hektar över en femårsperiod (Jordbruksverket 2021) en avgörande faktor. Begränsningen av hur mycket fosfor som får tillföras från organiska gödselmedel innebär att lantbrukare har ett incitament att prioritera gödselmedel med hög andel växttillgänglig näring. Om fosforn i slambiokol inte kan möta grödans behov inom den tillåtna spridningsmängden, måste lantbrukaren komplettera med mineralgödsel, vilket påverkar den ekonomiska lönsamheten.

Det faktum att slambiokolet har låg halt av kväve behöver inte innebära att det är en inkomplett gödningsprodukt. Inom utbudet för gödselmedel finns även de som innehåller främst fosfor och kalium och är fritt från kväve, anpassat för exempelvis odling av kvävefixerande grödor.

Beroende på hur villig man är att ta ett produktansvar, vilket förutsätter god kännedom om slambiokolets innehåll och effekter över tid, kan man profilera slambiokol som antingen ett avfall eller en produkt (med produktansvar). Det senare signalerar kvalitet och trovärdighet och är rimligtvis en förutsättning för att betalningsvilja och aktiv efterfrågan på materialet ska föreligga.

Ett alternativ för att öka användbarheten av slambiokol är att vidareförädla produkten. Detta kan innebära att förbättra dess fysiska form för att underlätta hantering och spridning. Figur 5.2 visar spridning av avloppsslam på åkermark. Skulle samma metod användas för torrt slambiokol skulle materialet spridas med vinden, varför det finns behov av förädling eller användning av annan teknik för spridning.

Figur 5.2
Spridning av slam på åkermark. Foto: Helena Liljestrand, Stockholm Vatten och Avfall.

Slambiokol skulle även kunna förädlas genom att berika det med näringsämnen som kväve eller andra viktiga komponenter. I litteraturen nämns också hur man har undersökt möjligheten att öka den växttillgängliga andelen fosfor genom tillsats av exempelvis svavelsyra och lut (se avsnitt 3.1.6).

Förädling kan inte bara öka slambiokolets effektivitet som gödselmedel utan också bidra till att distansera produkten från det negativa rykte som ibland förknippas med avloppsslam. Detta kan vara särskilt relevant i sammanhang där kulturella eller historiska faktorer skapar motstånd mot användning av slamprodukter, vilket kan försvåra marknadsintroduktionen.

I praktiken finns det två huvudsakliga modeller för vidareförädling:

- *Förädling inom VA-organisationernas verksamhet*:Förädlingen skulle i teorin kunna ske inom ramen för VA-organisationernas befintliga verksamhet. Beroende av vilken typ av förädling som utförs har det mer eller mindre påverkan på den befintliga verksamheten, t.ex. i form av ny teknik, utökad kompetens och anpassade processer. Dessutom skulle VA-organisationerna behöva ta ett produktansvar, inklusive frågor om säkerhet, funktionalitet och efterlevnad av regulatoriska krav.
- *Förädling genom en extern aktör*: Ett alternativ är att en extern aktör ansvarar för vidareförädlingen av slambiokol. En sådan aktör skulle rimligen också ta huvudansvaret för produktens kvalitet, säkerhet och marknadsintroduktion samt hantera eventuella regulatoriska utmaningar. Denna lösning kan även innebära att externa aktörer med expertis och resurser för produktutveckling och marknadsföring kan bidra till att minska de risker och kostnader som annars skulle belasta VA-organisationerna.

Enligt växtnäringsföretaget Yaras chefsagronom Ingemar Gruvaeus (2024, pers.kom.) finns en teoretisk möjlighet att Yara skulle kunna vara intresserat av att använda slambiokol i sina organomineraliska gödningsmedel. Detta gäller dock endast om vissa villkor är uppfyllda, bland annat:

- *Fastställd växttillgänglighet av fosfor:* För att säkerställa att fosforn är effektiv som näringsämne.
- *Renhetsgrad:* Materialet måste vara deklarerat med avseende på innehåll av potentiellt miljöskadliga ämnen.

Det är också avgörande att produkten accepteras av branschen för att möjliggöra en storskalig användning. Yara har för närvarande ingen produktion av organomineraliska gödningsmedel i Sverige, vilket innebär att en eventuell integration av slambiokol i deras produktlinje skulle kräva ytterligare utredningar och anpassningar.

Det är avgörande att växttillgängligheten av näringsämnen i slambiokol kan kvantifieras, särskilt med tanke på de lantbrukare som förväntas betala för materialet. Detta är en tydlig skillnad jämfört med dagens situation där avloppsslam ofta tillhandahålls gratis. Växtnäring är en betydande kostnadspost i en lantbrukares ekonomi, och slambiokol som en fosforgödningskälla med ett konkurrenskraftigt pris jämfört med andra fosforgödningsmedel kan ge en fördel på marknaden. Däremot innebär osäkerhet kring näringens växttillgänglighet en betydande värdeminskning för produkten.

Utöver detta måste slambiokol erbjudas i ett format som är lätt att hantera och sprida med lantbrukarens befintliga utrustning, se Figur 5.3. Om materialet kräver specialanpassad eller resursintensiv hantering påverkar detta betalningsviljan negativt och kan utgöra ett hinder för en bredare acceptans och användning.

Figur 5.3
Ett pelleterat kol kan förbättra hantering och spridning av materialet. Foto: EcoTopic AB.

Att slambiokol fungerar som en kolsänka vid jordapplikation och därmed bidrar till att minska klimatpåverkan är ett starkt miljöargument. Dock kan detta vara svårt att använda som motiv för ett högre pris om den enskilde lantbrukaren inte får en direkt ekonomisk avkastning i form av ökad lönsamhet. Klimatrelaterade fördelar och värden kommuniceras ofta genom standarder och certifieringar, snarare än via direkta fördelar för slutanvändaren.

Vidare påverkas slambiokolets attraktivitet och värde av attityder och acceptans både inom lantbruksbranschen och på avsalumarknaden. Det finns en generell polariserad inställning till slam i samhället, vilket också kan prägla uppfattningen om slambiokol. Denna aspekt bör tas i beaktande vid utformningen av marknadsföringsstrategier.

En möjlig väg framåt är att tydligt visa att de faktorer som begränsar användningen av avloppsslam, såsom oro för föroreningar eller tungmetaller, inte gäller för slambiokol. Detta skulle kunna bana väg för en bredare marknad. För att uppnå detta krävs dock omfattande och tillförlitliga underlag från forskning och praktiska försök som styrker produktens säkerhet och effektivitet. I Tabell 5.1 summeras slambiokolets förutsättningar som gödselmedel inom jordbruk. Vidare finns studier som visar att slambiokolet kan bidra till strukturförbättringar i jorden, öka den vattenhållande förmågan och minska bevattningsbehovet (Hosseinian et al. 2024) samt öka jordens bördighet och mikrobiella mångfald (Ahmad et al. 2022).

Inverkande parametrar på slambiokol som gödselmedel inom jordbruk	
Teknisk potential	Logistisk infrastruktur finns på plats. Krav på god hanter- och spridbarhet kompatibelt med lantbrukares befintliga utrustning.
Ekonomisk potential	Slam är ett gratis gödningsmedel för lantbrukare idag. Andra gödselprodukter utgör en stor post i ekonomisk kalkyl. Slambiokol skulle kunna sikta på att hamna någonstans däremellan beroende av graden växttillgänglig näring.
Risker	Okända markeffekter över tid. Risk för ackumulering av tungmetaller i jord.
Kunskapsluckor	Det saknas kunskap om de långsiktiga effekterna av slambiokol i jordbruksmiljöer, inkl. fosfortillgänglighet.
Feedback från potentiella användare	Produktspecifikation, produktansvar, acceptens på avsalumarknad och tydlig förbättring jämfört med slam är en förutsättning för förekommande av betalningsvilja.
Fördelar med applikationen	Recirkulering av växttillgänglig andel fosfor i system där det behövs. Det finns en redan befintlig infrastruktur för spridning av slam på åkermark, vilket gör att slambiokolet kan integreras i samma system.
Nackdelar med applikationen	Osäkerhet om slambiokolets inverkan på markhälsa och grödornas näringskvalitet (på sikt).
Övrigt	Slambiokol kan klassificeras antingen som ett avfall, likt slam i dag, eller som en produkt. Denna distinktion kommer att påverka vilka krav som ställs på kännedom om produktens egenskaper, liksom producentens ansvar. Dessutom har denna klassificering stor inverkan på den ekonomiska affären, då ett tydligt produktansvar kan öka förtroendet och betalningsviljan på marknaden.

Tabell 5.1
Inverkande parametrar på slambiokolets potential som gödselmedel inom jordbruk.

5.1.2 Jordförbättringsmedel i urbana miljöer

Om det fastställs att växttillgängligheten av fosfor i slambiokol inte är tillräcklig inom den tidsram som krävs för att slambiokol ska kunna fungera som ett attraktivt gödningsmedel inom jordbruket, kan urbana tillämpningar där höga fosfornivåer inte är önskvärda, eller där det finns tolerans för långsammare frisättning, utgöra ett alternativ.

För närvarande används biokol från träbaserad råvara främst i urbana växtbäddar i Sverige, se Figur 5.4. Biokolet beskrivs som en mångsidig resurs, både som en kolsänka och för sin förmåga att binda vatten och näringsämnen i substrat. Detta är särskilt viktigt i sammanhang där man vill minimera mängden organiskt material, såsom kompost, för att undvika sättningar eller behovet av regelbunden påfyllning till följd av nedbrytning. Samtidigt strävar man efter att biokolet ska bidra till rening och förbättrad kvalitet på dagvatten.

Figur 5.4
Det träbaserade biokolet har i dag sin primära avsättning i urbana växtbäddar där dess höga närings- och vattenhållande kapacitet möjliggör nya stenbaserade substrat med hög bärighet och generöst utrymme för trädrötter att sprida sig. Foto: EcoTopic AB.

En avgörande faktor i dessa tillämpningar är att biokolet inte får bidra till ökade fosforutsläpp, eftersom detta kan förvärra övergödningsproblematiken i känsliga vattenrecipienter. Dessutom ställs ofta krav på produktens fysikaliska egenskaper. Många beställare önskar att biokolet innehåller minimalt med finpartikulära fraktioner (mindre än cirka 5 mm), eftersom dessa riskerar att sköljas ur växtbäddarna och därigenom påverka funktionaliteten negativt.

Vid upphandlingar kan det förekomma specifika krav på biokolets egenskaper, såsom en maximal askhalt, att det tillverkas av träbaserad råvara eller att det är certifierat enligt European Biochar Certificate (EBC). I sådana fall uppfyller slambiokol inte kraven och kvalificerar sig därmed inte för dessa applikationer.

I situationer där beställare inte är mer specifika än att de efterfrågar "biokol" är det avgörande att tydligt klargöra om det handlar om slambiokol. Detta minskar risken för missförstånd och potentiella negativa konsekvenser, såsom oönskade resultat eller negativ uppmärksamhet som kan påverka både slambiokol och biokol generellt. Målet bör vara att identifiera tillämpningar där slambiokolets unika egenskaper blir en styrka.

Slambiokolets möjliga introduktion på den urbana marknaden väcker två centrala frågor:

- *Risk för utsläpp av fosfor och tungmetaller* Det finns en oro för att fosfor och eventuellt tungmetaller kan frigöras över tid, särskilt om de kemiska och biologiska förhållandena i jordmiljön förändras. I avsnitt 3.1.6 finns figurer över olika (slam)biokols fosfatfosforläckage som illustrerar hur olika biokol presterar. I avsnitt 3.1.7 nämns hur studier rapporterar om att slambiokol skulle ha potential att immobilisera tungmetaller i jord, till och med bättre än andra växtbaserade biokol, men mer forskning behövs. En möjlig lösning kan vara att använda slambiokol i andra grönytor, som parker eller fotbollsplaner, där kopplingen till dagvattenhantering är mindre kritisk.
- *Fosforrecirkuleringens effektivitet* Om slambiokol inte används i jordbruksapplikationer, där fosfor behövs mest, kan incitamentet för att pyrolysera slam minska. Detta väcker frågan om hur vi bäst balanserar slambiokolets styrkor som klimatvänlig produkt med behovet av fosforrecirkulering inom mat- och foderproduktion.

Det finns också en kulturell aspekt kopplad till användningen av avloppsslam som påverkar perceptionen av slambiokol. Många jordproducenter uttrycker ovilja att använda slam, ofta av rädsla för att deras varumärke ska förknippas med detta material. En jordproducent var dock öppen för att använda slambiokol som fosforgödningskälla, förutsatt att fosforns växttillgänglighet kan verifieras. Andra producenter ser däremot inga tydliga fördelar med att blanda slambiokol i sina produkter, då de anser att det saknas ett kommunicerbart värde som kan attrahera kunder.

Historiska exempel på problem kopplade till användningen av avloppsslam i stadsmiljöer, som markföroreningarna i Riddersvik, Stockholm (Stockholms stad 2024), bidrar också till en fortsatt skepsis. Även om slambiokol inte nödvändigtvis innebär samma risker, är den kulturella stigmatiseringen kring slam en utmaning som måste adresseras vid en eventuell marknadsintroduktion.

Samtidigt ökar medvetenheten om vikten av hållbara och cirkulära system, vilket kan bidra till att förbättra uppfattningen om avloppsslam och därmed även om slambiokol. En tydlig kommunikation om produktens fördelar, stöd av forskningsbaserade underlag samt strategier för att hantera kulturella barriärer är därför avgörande för att skapa acceptans och efterfrågan. I Tabell 5.2 summeras slambiokolets potential som jordförbättringsmedel i urbana miljöer.

Inverkande parametrar på slambiokol som jordförbättringsmedel i urbana miljöer	
Teknisk potential	Eventuell benchmark mot biokol inom anläggningsjordar (ej nära dagvattenhantering).
Ekonomisk potential	God betalningsvilja för träbaserat biokol inom urbana växtbäddar i dag. Slambiokol skulle kunna konkurrera som en billigare produkt, men viktigt med transparens kring materialets egenskaper.
Risker	Oklart om risk finns att fosfor och tungmetaller eventuellt lakar ut till känsliga recipienter över tid vilket tills vidare begränsar bredden på möjliga urbana applikationer.
Kunskapsluckor	Det finns en osäkerhet kring tungmetalleffekter och hur växttillgängligheten av fosfor i slambiokol förändras över tid.
Feedback från potentiella användare	Kulturell polarisering kring produkter kopplat till slam. Acceptans inom branschen är avgörande för marknadsvärde, betalningsvilja och användning.
Fördelar med applikationen	Riskerar ej påverka matproduktionssystem negativt i det fall exempelvis tungmetaller tas upp av växterna.
Nackdelar med applikationen	Recirkulerar ej näringsämnen, i synnerhet fosfor, där det behövs som mest.
Övrigt	Det är viktigt att tydligt kommunicera skillnaderna mellan slambiokol och träbaserat biokol för att förhindra att missförstånd underminerar förtroende för produkten.

Tabell 5.2
Inverkande parametrar på slambiokolets potential som jordförbättringsmedel i urbana miljöer.

5.1.3 Filtermaterial

Biokol (ej slambiokol) har länge föreslagits som en potentiell ersättning för aktivt kol i filterapplikationer, ett användningsområde som diskuterats sedan biokolsbranschens begynnelse. Trots omfattande forskningsinsatser har detta ännu inte fått genomslag. Eventuella kostnadsbesparingar kan inte fullt ut motivera den försämrade filterkvalitet som biokol ofta uppvisar jämfört med etablerade aktiva kolmaterial. Variationer i biokolets råmaterial får inte heller leda till oacceptabla fluktuationer i filterfunktion, eftersom stabil prestanda är avgörande i de flesta filterapplikationer.

För att använda och/eller sälja slambiokol som en filterprodukt krävs ytterligare data och validering. Det är nödvändigt att fastställa fysiokemiska egenskaper för det specifika slambiokolet och säkerställa att dessa överensstämmer med krav på sorbenter för aktuella föroreningar. Reningspotentialen behöver också bekräftas genom försök som tar hänsyn till de kemiska, fysikaliska och biologiska parametrar som påverkar filtereffektiviteten, inklusive flöden och kontakttid. En ytterligare utmaning är att säkerställa att filtret klarar de variationer som kan uppstå i en råvara som slam.

Ett centralt övervägande är avsättningen för ett förbrukat filter. Här uppstår frågor om möjligheten till regenerering och i vilken mån en sådan process kan bidra till att skapa en certifierbar kolsänka. Om regenerering inte är möjlig, måste det finnas en hållbar hantering av det använda filtret för att undvika negativa miljöeffekter.

När det gäller slambiokol är marknadsintroduktionen för filter ännu mer avlägsen än för biokol från träbaserad råvara. Slambiokolets betydligt lägre kolhalt och högre askhalt kan begränsa dess funktionalitet i filterapplikationer. Kunskapsläget kring dess specifika egenskaper är dessutom begränsat, vilket ökar osäkerheten kring dess reningseffektivitet.

Det finns dock potentiella incitament för vidare forskning och utveckling. VA-organisationer använder i dag i ett fåtal fall aktivt kol i reningsprocesser för avloppsvatten, men fler anläggningar planeras för att hantera mikroföroreningar. Detta innebär en potential att utveckla en filterprodukt baserad på slambiokol, vilket skulle kunna skapa synergier inom avloppshanteringen och öka intresset för att undersöka möjligheter till regenerering och optimering av filter.

Slutsatsen är att filterapplikationer för slambiokol kräver betydande insatser i form av forskning, produktutveckling och affärsmodellering innan de kan bli konkurrenskraftiga. På kortare sikt är användning av slambiokol som gödselmedel inom jordbruk eller urban miljö mer realistisk. Tabell 5.3 summerar slambiokolets potential som filter. För en mer detaljerad jämförelse mellan slambiokol och aktivt kol se Bilaga A *Jämförelse mellan slambiokol och befintliga alternativ*.

Inverkande parametrar på slambiokol som filter	
Teknisk potential	Slambiokolet behöver matcha filterapplikationens krav.
Ekonomisk potential	Den lägre kolhalten kan påverka filterkapaciteten och därmed minska produktens attraktionskraft på marknaden, vilket gör att en lägre prisnivå kan vara nödvändig för att göra den konkurrensduglig.
Risker	Det finns risk för variation i råmaterialets kvalitet.
Kunskapsluckor	Fysiokemiska data kring specifikt slambiokol saknas. Dess reningspotential och effekt i olika system behöver kartläggas. Försök krävs. Oklart om applikationen kan leda till en kolsänka.
Feedback från potentiella användare	Feedback saknas i dagsläget då vägen till marknadsintroduktion fortfarande är för lång.
Fördelar med applikationen	Kan användas inom den egna verksamheten för lägre produktansvar och större kontroll.
Nackdelar med applikationen	Recirkulerar inte fosfor. Potentiell risk för fosforläckage. Långsammare marknadsintroduktion jämfört med jord(bruks)applikation.
Övrigt	Krav på tester för verifiering av reningseffekt och avsättning för förbrukat filter eller potential för regenerering. Extern aktör för förädling kan minska risker och kostnader.

Tabell 5.3
Inverkande parametrar på slambiokolets potential som filter.

5.1.4 Övriga användningsområden

Det finns ett växande intresse för nya användningsområden för växtbaserade biokol utöver de mer vanligt förekommande inom urbana jordar och som filter (även om det senare fortfarande kan anses oetablerat). Vid utveckling av marknader för slambiokol kan det vara bra att känna till dessa tillämpningar och hur slambiokolets potential för dem ser ut. I vissa fall ser slambiokolet ut att inte kunna möta applikationens kravspecifikation och väntas aldrig bli aktuella. I andra fall finns kanske en potential men denna behöver verifieras och en marknad byggas. Dessa applikationer bedöms således ligga längst ifrån en marknadsintroduktion för slambiokol i dag.

I Tabell 5.4 redovisas kortfattat några mer eller mindre aktuella alternativa användningsområden för slambiokol. Här är det återigen avgörande att inte förväxla positiva resultat från växtbaserade biokol med slambiokolets med tanke på påtagliga skillnader mellan dem (se Bilaga A).

Användningsområde	Beskrivning
Bränsle	Enligt tekniktillverkare skänks eller säljs den begränsade mängd slambiokol som produceras i Europa i dag primärt som bränsle. En fördel är att det därmed skulle kunna finnas betalningsvilja för energiproduktion. Nackdelen är att slambiokol vid förbränning varken fungerar som kolsänka eller bidrar till cirkulationen av fosfor. Detta skulle dock kunna vara ett alternativ för att möjliggöra pyrolys av avloppsslam med högre föroreningshalt, och som därmed inte är lämpligt för spridning på åkermark.
Betong	Vissa typer av biokol har potential att ingå i betong och ersätta en del av cementen (Barbhuiya et al. 2024). Det ställs dock mycket höga krav på biokolets specifika egenskaper. Den låga kolsänkepotentialen i slambiokol bedöms motverka incitamenten att använda materialet då det huvudsakliga syftet är att minska betongens klimatpåverkan. Eventuella föroreningar utgör ingen risk för ekosystem. Denna applikation recirkulerar ej fosfor, men utgör en stabil kolsänka.
Kompositer	Litteraturen visar att det finns både potential och utmaningar för biokol inom detta område (Yasim-Anuar et al. 2022; Bartoli et al. 2022), och att omfattande utveckling krävs för att slambiokol ska kunna användas i kompositer. Utgör potentiellt en kolsänka men recirkulerar inte fosfor.
Stålindustri	Stålindustrin kräver stora mängder material, ofta i storleksordningen tiotusentals ton. Vissa biokol kvalificerar sig för att ersätta fossilt kol i processen, men det finns specifika krav på bland annat hög kolhalt (ca 80 %), låg askhalt (<10 %), samt lågt näringsinnehåll (framför allt svavel och fosfor) (Hansson 2024, pers.kom.). Ej troligt att slambiokol kommer kunna möta kriterierna. Ersätter fossilt kol, men utgör ej kolsänka och recirkulerar inte fosfor.
Fastläggning av förorenad mark	Biokol har i försök visat god potential för att remediera förorenad mark (Re:source 2023). Dock är effekterna över tid fortfarande oklara, och det krävs försök med slambiokol för att kartlägga hur det presterar i detta sammanhang. Ännu ingen etablerad marknad för produkter med denna funktion. Utgör en kolsänka, men recirkulerar inte fosfor.
Spridning i skogsmark	Det finns studier gjorda på användning av biokol i skogsbruk där man kunnat se positiva resultat (Grau-Andrés et al. 2021), men däremot saknas erfarenhet av användning av slambiokol. För skogsbruket finns ett delat intresse: å ena sidan att sprida gödningsmedel för att öka tillväxten, kolinbindningen och därmed markens bonitet, å andra sidan studier som pekar på risk för försämrad biodiversitet (Jämtgård et al. 2023). Vissa fosfortyper anges kunna bli växttillgängliga i större utsträckning i skogsmark med lägre pH, jämfört med jordbruksmark (Shen et al. 2011).

Tabell 5.4
Övriga potentiella användningsområden för slambiokol.

5.2 Attityder och förväntningar

För att inkludera attityder och inställningar gentemot dels avloppsslam och slamspridning, dels slambiokol som produkt har lantbrukare, intresseorganisationer med inflytande över lantbruk, leverantörer och köpare av jordsubstrat till urban miljö intervjuats. Syftet har varit att identifiera utmaningar och styrkor för slambiokolets marknadsintroduktion, med primärt fokus på jord- och substratapplikation, då detta bedöms vara det användningsområde som har potential att snabbast nå marknaden och vara avsättningen med störst kvantitativ potential. Se Bilaga B, *Genomförande av intervjuer,* för metodbeskrivning och lista över intervjuade personer.

5.2.1 Lantbrukare

Lantbrukare som tar emot och sprider avloppsslam i dag saknar i regel djurhållning i sin verksamhet och därmed ser de avloppsslam som ett billigt gödselmedel. Jämfört med konstgödsel bidrar avloppsslam till ökat mikroliv i jorden och tillför grundämnet kol. Detta leder i sin tur till att jordens vattenhållande kapacitet ökar, vilket skapar jordar med bättre motståndskraft mot varierande väder med såväl torka som kraftig nederbörd. Det finns en oro för de skadliga ämnen som tillförs via slammet, speciellt med tanke på eventuella striktare regelverk i framtiden.

Lantbrukare lyfter att hur väl ett nytt material passar in i den befintliga verksamheten rent praktiskt är mycket viktigt. Kan man använda befintlig utrustning och applicera inom redan befintliga aktiviteter på jordbruksmarken innebär det att man undviker tillkommande kostnader. Lantbrukare som sprider avloppsslam berättar att det är

utmanande att hantera och därmed kan vara svårt att få jämnt fördelat på åkern. Om slambiokol kan levereras i ett format som underlättar spridning, till exempel pellets eller granulat, är det en stor fördel. Det faktum att avloppsslam luktar begränsar när och var avloppsslam kan spridas. Lantbrukare lyfter att dålig lukt från slam skapar irritation hos boende i området på ett annat sätt än lukt från stallgödsel. Att slambiokol är luktfritt är därmed en stor fördel.

Intresset för slambiokol är positivt och man efterfrågar fält- och gårdsförsök för att få se hur det beter sig utanför labbmiljön. Användningen av avloppsslam begränsas till vissa typer av arealer och uppköpare av jordbruksprodukter. Med uppköpare avses exempelvis företag som köper upp spannmål eller andra grödor för livsmedels- eller djurfoderproduktion. Lantbrukarna lyfter uppköparnas inställning till avloppsslam som avgörande för slamanvändning och om uppköparna godkänner användning av slambiokol ser lantbrukarna mycket positivt på att sprida det. Det råder skilda meningar om vikten av att slambiokol har ett lågt innehåll av kväve, vilket kan förklaras av de enskilda lantbrukens specifika behov. Däremot ser de en fördel om det skapas en komplett gödselprodukt av slambiokolet där även spridbarheten säkerställs.

Ur ett ekonomiskt perspektiv är lantbrukare mycket tveksamma till om det finns en betalningsvilja för slambiokol. De lyfter att en mycket grundläggande förutsättning för detta är att någon tar ett produktansvar och därmed garanterar vilka effekter som lantbrukaren kan räkna med i sin odling. Lantbrukaren måste kunna se värdet av att använda slambiokol i sin egen kalkyl och jämför med konstgödsel där det finns ett tydligt värde på till exempel fosfor. Att man då inte kan garantera grad av växttillgänglighet för näringsämnen i slambiokol utgör ett problem eftersom det finns en begränsning av mängd totalfosfor som får tillföras. Jämför man med avloppsslam så kostar det inte lantbrukaren något, varför mottagning kan accepteras bara utifrån möjligheten att det kan ha en positiv effekt. Det finns även lantbrukare som lyfter det faktum att det rent etiskt inte är rätt att lantbrukare ska betala för att de bidrar till att lösa det samhällsproblem som hanteringen av slam utgör utan i stället kompenseras för att de möjliggör ett cirkulärt system för kol och fosfor.

5.2.2 Representanter för intresseorganisationer inom lantbruk

Efter introduktion av slambiokol för representanter från Lantbrukarnas Riksförbund, LRF, uttrycker de att de kommer att följa utvecklingen med stort intresse. Det är framför allt potentialen att hantera föroreningar och att skapa en kolsänka som de ser som extra intressant. LRF följer strömningar inom lantbrukssektorn och har en viktig roll som kommunikationskanal. LRF har nyligen publicerat en artikel där de rekommenderar användning av Revaq-certifierat slam (LRF 2024), och om det kommer framtida positiva erfarenheter av slambiokol och branschen har ett stort intresse skulle de kunna komma ut med en liknande rekommendation. I ett första skede är dock LRF:s roll att följa och kommunicera utvecklingen.

Intervjuade lantbrukare var eniga om att uppköparens inställning till användning av slambiokol är avgörande för om lantbrukaren själv ska överväga spridning. Under samtal framför lantbrukskooperativet Lantmännen att de ser positivt på utvecklingen med slambiokol och trycker på vikten av Revaq då det är ett bra verktyg för att sätta press på avloppsreningsverken att leverera ett rent och dokumenterat material. Spontant så ser intervjuade representanter för Lantmännen inga problem med att godkänna användning av slambiokol, utan lyfter snarare en möjlighet att godkänna användning av slambiokol vid odling av grödor som inte godkänner spridning av slam i dag. För att göra denna bedömning behövs det dock mer kunskap om slambiokol. Under samtalet påpekar Lantmännen även att de oklarheter som finns kring slambiokolets fosfortillgänglighet i viss mån även fortfarande finns för avloppsslam.

Svenska Foder lyfter att huruvida kvarnar accepterar att mala spannmål som odlats på arealer med slamspridning är en avgörande faktor som påverkar möjligheten för

slambiokol. Under intervjun påpekas det att det finns kunder i flera led, där alla vill vara säkra på att just deras kund godkänner användningen av slam eller i detta fall slambiokol. Svenska Kvarnföreningen berättar att de är väldigt försiktiga med att acceptera spannmål från arealer med slamspridning. De berättar att EU skärper sin lagstiftning kring växternas upptag av tungmetaller och med tanke på slammets höga tungmetallhalter är det viktigt att förstå hur det påverkar växterna. Hur hårt tungmetallerna är bundna i slambiokolet och hur eller när de påverkar växterna bör klargöras även för slambiokol.

I samtal med intresseorganisationer och lantbrukare blir det tydligt att så länge det inte finns separata studier på slambiokol kommer det med stor sannolikhet att hanteras och bedömas som avloppsslam. Lantbrukets erfarenhet av biokol är fortsatt begränsad, och med tanke på det utvecklade regelverket för avloppsslam vill man inte riskera att göra fel. Intresset är dock stort då intresseorganisationerna lägger ett större värde i minskade föroreningar och kolsänkan. De lyfter även att det inte finns någon tydlig beslutsprocess men att de vill ha mer information om slambiokol och öppnar för en fortsatt dialog. Det faktum att Revaq inkluderat slamkol ses som mycket positivt och något som kan förkorta en eventuell godkännandeprocess. Kan man genom forskning och försök bevisa att slambiokol är renare än slam och inte bidrar till växters ökade upptag av föroreningar ser man även möjlighet till att se över godkännande av slambiokol för odlingar som inte godkänner avloppsslam i dag.

5.2.3 Urban miljö

De företag som levererar jordprodukter och substrat till urban miljö och som vi intervjuat använder i regel inte avloppsslam i sina produkter av flera anledningar. Det skäl som lyfts genomgående är risken för att det påverkar företagets varumärke negativt. Man vill inte förknippas med avloppsslam så länge det finns en stigmatiserad kultur och negativ uppfattning om avloppsslam bland kunderna. Hos privatpersoner finns en tydlig så kallad ”äckelfaktor” både på grund av slammets ursprung och att det luktar. Inom anläggning i urban miljö finns negativa erfarenheter av användning av slam. Man berättar om projekt där användning av slam resulterat i för höga föroreningshalter vilket i sin tur resulterat i att man behövt vidta kostsamma saneringsåtgärder vid etablering av bostäder, och minnet av dessa projekt lever kvar.

Företagen som producerar jord berättar att de kan överväga att blanda in nya material i sina jordprodukter, men att det måste finnas ett tydligt värde. Kan det ersätta ett befintligt material med avseende på funktion och kostnad? Tillför det produkten något värdefullt som kan generera marknadsföringsvärde? Utgångspunkten är att man vill bygga jordar på bra material med hög kvalitet, inte lösa kvittblivningsproblematik. Om man kan svara positivt på dessa frågor avseende slambiokol finns ett intresse men det finns även en tydlighet kring att utvecklingen av produkten och bevis för hur den fungerar måste tas av andra parter än jordföretagen.

Erfarenheten kring biokol i urban miljö är god och man ser inte någon möjlighet att ersätta växtbaserat biokol med slambiokol med hänvisning till att det är helt skilda material. En jordtillverkare nämner också att sammanblandning av biokol och slambiokol tar bort förtroendet för den som pratar om det. Däremot skulle det eventuellt finnas en möjlighet att blanda in slambiokol som näringsgiva i AMA-jordar, men då måste man veta hur materialet fungerar. En AMA-jord är en standardiserad jordtyp som följer riktlinjerna i AMA (Allmän Material- och Arbetsbeskrivning). Denna typ av jord är särskilt utformad för användning i anläggningsarbeten, som plantering av buskar och träd i urbana miljöer. Biokol är i dag inte aktuellt i AMA-jordar eftersom det är för dyrt.

De potentiella fördelar som intervjuade parter lyfter med slambiokol är lågt pH och näringskälla. De ser gärna att tester på slambiokol utförs som bekräftar renhet och kartlägger egenskaper som vattenhållande förmåga, tungmetallinnehåll och fosfortillgänglighet. Fraktionsstorleksfördelning och huruvida det dammar är också viktigt att känna till. Om slambiokolet är för fint finns risk att det fyller och täpper till porer i substratet.

I dagsläget är intresset och betalningsviljan hos jord- och substrattillverkare för en produkt som slambiokol således lågt och det är till synes starkt kopplat till efterfrågan på marknaden och kundernas inställning.

En slutsats från samtliga intervjuer är att marknadsintroduktion av slambiokol i urban miljö förutsätter dels kommunikativa insatser för att lyfta positiva delar som väger upp den så kallade ”äckelfaktorn”, dels bevis för hur slambiokol beter sig med avseende på näring, föroreningar och växttillgänglighet. Eftersom slambiokol som material i grunden skiljer sig från ursprungsmaterialet (avloppsslam) lyfts förslaget att ge det ett separat namn utan att använda ordet ”slam”, för att underlätta dess acceptans på marknaden, vilket bland annat gjordes vid etableringen av PYREGphos (Pyreg 2020). Samtidigt är det viktigt att det inte riskerar att förväxlas med växtbaserat biokol. Att slambiokol öppnar för cirkularitet och är klimatsmart är något man är positiv till och i de fall produkten presterar bra i tester och försök är man trots allt intresserad. Utförs det försök är de intresserade av resultaten och om man kan påvisa positiva effekter så finns en viss betalningsvilja.

5.2.4 Sammanfattning

I den introduktion som gjordes av slambiokol i intervjuerna har vi varit noga med att lyfta möjligheter, oklarheter och eventuella risker med pyrolys av avloppsslam. Samtliga intervjuade parter är dock generellt positiva till slambiokol och intresserade av att veta mer och följa utvecklingen av kommande projekt. Intresseorganisationerna inom lantbrukssektorn är intresserade av att föra en fortsatt dialog.

Det som både lantbrukare och jordföretag lyfter är att slambiokolets fördelar och risker måste bevisas i såväl forskning som i större försök samt att någon måste anamma ett produktansvar. Man måste kunna räkna på vilka värden som materialet tillför, vilket är direkt knutet till eventuell betalningsvilja.

Lantbrukare och jordföretag lyfter enklare hantering och minskad lukt som en stor fördel för slambiokol jämfört med avloppsslam, vilket skulle kunna nyttjas för att motverka den negativa bilden som uppstår som ett resultat av att slambiokolet härstammar från just slam. Kommunikationsinsatser kring slambiokol kommer vara en viktig del för att skapa acceptans och på ett tydligt sätt visa slambiokol som ett eget material, skilt från både avloppsslam och biokol.

5.3 Dagens ekonomiska förutsättningar för slambiokol

I detta avsnitt beskrivs aspekter som påverkar de ekonomiska förutsättningarna relaterat till pyrolys av avloppsslam i dag.

5.3.1 Förutsättningar för betalningsvilja

Avloppsslam klassas i dag som ett avfall men regelverk finns som möjliggör användning som gödselmedel, vilket vi beskrivit i kapitel 4. Även om det finns efterfrågan från bland annat lantbrukare att ta emot avloppsslam för spridning på åkermark finns ingen betalningsvilja. Acceptansen för avloppsslam skiljer sig dessutom åt geografiskt. Intervjuade personer nämner bland annat att spridningen av avloppsslam generellt är mer accepterad i södra Sverige. Avloppsreningsverken belastas med kvittblivningskostnad till entreprenör som tar emot slammet och i sin tur betalar spridningsersättning till lantbrukare. Kvittblivningskostnaden skiljer sig åt över landet. Att gå från en situation där entreprenör och lantbrukare får ersättning för att ta emot avloppsslam till att avloppsreningsverken kan ta betalt för slambiokol är en utmaning. Möjligheten ligger i om fördelarna med slambiokol ger ett ekonomiskt värde som överstiger värdet med avloppsslammet för användaren.

I intervjuer med lantbrukare framför de att om de ska betala för att sprida slambiokol måste de kunna räkna på vilket ekonomiskt värde som det ger till deras verksamhet. Detta kräver att slambiokol utgör en produkt med bevisade positiva egenskaper som gödningsmedel eller jordförbättringsmedel. Lantbrukarna lyfter värdet av att någon tar ett produktansvar och kan garantera slambiokolets funktion och ta ansvar för eventuell negativ påverkan. Projektgruppen diskuterar även att ett gångbart sätt att beräkna värdet på slambiokol är att jämföra med värdet av fosfor, vilket dock förutsätter att man kan säkerställa andelen växttillgänglig fosfor i slambiokolet.

Eftersom lantbrukare i dag har en situation där de får spridningsersättning för att sprida avloppsslam innebär det dessutom att det är slambiokolets mervärde jämfört med avloppsslam som ska motivera den ekonomiska skillnaden mellan att få betalt och att betala för gödselmedlet. Med de skillnader mellan avloppsslam och slambiokol som beskrivits tidigare i rapporten finns det underlag som indikerar att detta mervärde finns, men intervjuade lantbrukare är väldigt tydliga och eniga om att bevisbördan ligger på den part som är villig att ta produktansvaret. Sen kan man ställa sig frågan om man genom att jämföra avloppsslam med slambiokol jämför ”äpplen och päron”. Enbart slambiokolets stabila kolstruktur och renhet jämfört med avloppsslam talar för att så är fallet, men det krävs ytterligare studier och försök för att etablera bilden av slambiokol som en egen produkt, vilket intervjuade lantbrukare också nämner.

Slutligen kvarstår det faktum att det är avloppsreningsverken som är i beroendeställning eftersom de måste bli av med sitt slambiokol, vilket också speglas i intervjuer med lantbrukare. De framför sin syn att lantbruket, genom dagens spridning av avloppsslam, möjliggör ett cirkulärt system men att de också tar en risk vilket bör kompenseras ekonomiskt.

5.3.2 Ökad eller minskad kostnad för hantering

Utöver värdet av fosfor nämner lantbrukare även vikten av hur hanteringen av slambiokol kan integreras i deras befintliga verksamhet. Om ett nytt material kräver nya rutiner eller maskiner innebär det ökade kostnader för hantering. Kan man i stället använda befintliga maskiner eller reducera antalet aktiviteter kan det innebära kostnadsbesparingar, vilket kan motivera betalningsvilja.

Hur slambiokol rent praktiskt ska hanteras för att spridas på åkermark finns det fortsatt många frågor kring. Slambiokol är ett lätt och fint material. Innebär det att spridning måste anpassas efter väder? Kan slambiokol spridas separat med befintliga maskiner eller måste det blandas med annan gödning för att säkerställa tillfredsställande spridning? Intervjuade lantbrukare ser dock inte att hanteringen kommer att utgöra något större problem utan att det kommer lösa sig när användare får tillgång till slambiokol i större mängder. Ser vi till användning av slambiokol i urbana jordar finns erfarenhet av inblandning av biokol i substrat.

5.3.3 Substitution av dyrare alternativ

Aktörer som säljer urbana jordar nämner att om slambiokol kan ersätta ett dyrare material kan det öka intresset. Utgångspunkten när de väljer material till olika jordar är varje komponents funktion i slutprodukten. I dagsläget har de vi intervjuat svårt att se vad slambiokolet skulle kunna substituera, men lyfter ändå att det finns väldigt intressanta aspekter.

5.3.4 Minskad kvittblivningskostnad

Utgår vi från ett avloppsslam med 25 % torrsubstanshalt (TS-halt) och en omvandlingsfaktor (från representativt, orötat, danskt avloppsslam) till slambiokol om 42 % (Wieth 2024, pers.kom.) innebär pyrolysprocessen inklusive torkning att mängden avloppsslam med avseende på vikt kan reduceras med upp till 90 % till slambiokol. Detta medför minskade kostnader för kvittblivning och transporter. Beroende på nivån på

kvittblivningskostnaden för det specifika avloppsreningsverket kan minskad kvittblivningskostnad ha en betydande ekonomisk potential. I avsnitt 9.4 görs en nuvärdesanalys av olika affärsscenarier för pyrolys av avloppsslam.

5.3.5 Inställning till avloppsslam

Olika sektorers och aktörers generella inställning till användning av avloppsslam kan ha stor inverkan på de ekonomiska förutsättningarna för slambiokol. Inställningen till huruvida avloppsslam bör spridas på åkermark eller om det ska blandas i trädgårdsjord kan tidvis upplevas som polariserad och lantbrukare nämner även här att acceptansen skiljer sig mellan olika regioner. Med tanke på slambiokolets nära koppling till avloppsslam är det därför troligt att negativa åsikter spiller över, även om många av de negativa delar med avloppsslam som lyfts kan hanteras genom pyrolys. Samtidigt kan de som ställer sig positiva till avloppsslam välja att antingen se det positiva med minskade föroreningar och stabil kolstruktur med mera, eller att fokusera på förlusten av kväve. Oavsett kommer inställningen till avloppsslam påverka marknadsmässiga förutsättningar för slambiokol, men genom tydlig och trovärdig kommunikation kan VA-branschen bygga bilden av slambiokol som ett eget material mer eller mindre separerat från sitt ursprung.

6 Marknad för BCR-krediter

FN:s mellanstatliga klimatpanel, IPCC, definierar CDR (Carbon Dioxide Removal) som antropogena aktiviteter som avlägsnar CO_2 från atmosfären och lagrar den varaktigt i geologiska, terrestra eller oceaniska reservoarer eller i produkter (Möller et al. 2022), vilket överensstämmer med EU:s definition av *permanent carbon removals* (European Commission 2024). I denna rapport använder vi termen kolsänka för att beskriva borttagning av CO_2 från atmosfären genom mänsklig aktivitet.

Det finns certifieringsstandarder som erbjuder certifiering av den positiva klimateffekten orsakad av kolsänkan. Certifiering möjliggör försäljning av krediter som kompenserar för utsläpp som köparen orsakar (se exempel för slambiokol i avsnitt 4.6). Klimatkompensation säljs på den frivilliga marknaden och delas upp i två huvudkategorier: *undvikande/reducerande* (eng. avoidance/reduction) respektive *borttagande/nedlåsande* (eng. removal/sequestration (non fossil)). Exempel på undvikande/reducerande är förnybar energi och exempel på borttagande/nedlåsande är återbeskogning och Carbon Capture and Storage (CCS) (Carbon Credits Inc 2024). De undvikande/reducerande respektive borttagande/nedlåsande delas i sin tur upp i *naturbaserade* (eng. nature based) och i *teknikbaserade* (eng. technology based) åtgärder. Exempel på naturbaserad och teknikbaserad undvikande åtgärd är förbättrad skogsskötsel respektive förnybar energi. Exempel på naturbaserad borttagande åtgärd är återbeskogning, och exempel på teknikbaserad borttagande åtgärd är biokol (Senken 2024). Slutligen benämns kolsänkor som skapas baserat på olika typer av biokol, inklusive slambiokol, som Biochar Carbon Removal, BCR (Carbonfuture 2024).

Vi skiljer på klimatkompensation och utsläppsrätter. Det finns olika system för handel med utsläppsrätter, däribland EU:s utsläppshandelssystem, EU Emission Trading System (EU ETS) (Naturvårdsverket 2024d). EU ETS infördes 2005 och initialt inkluderade systemet endast energiintensiv industri (olja, stål, järn, cement, med flera), el- och värmeproduktion, flygoperatörer och rederier, men fler branscher har därefter lagts till (Naturvårdsverket 2024d). Kommande utökning till EU ETS2 kommer även att inkludera byggnader, vägtransporter och ett urval av mindre industrier (Naturvårdsverket 2024d). Deltagarna inom EU ETS tilldelas ett utsläppstak som anger hur stora utsläpp de får orsaka och får därmed köpa eller tilldelas utsläppsrätter. Det totala antalet tillgängliga utsläppsrätter minskas successivt. Skulle deltagare inte nå upp till sitt utsläppstak kan de sälja de outnyttjade utsläppsrätterna (Naturvårdsverket 2024d). Det pågår diskussioner om vilka möjligheter och utmaningar det skulle innebära att även inkludera BCR-krediter i EU ETS.

6.1 Benämning

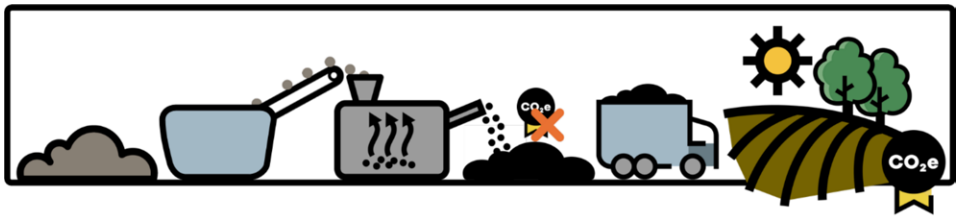
I rapporten använder vi begrepp baserat på definitionerna nedan.

Kolsänka: Antropogena aktiviteter som avlägsnar CO_2 från atmosfären och lagrar den varaktigt i geologiska, terrestra eller oceaniska reservoarer eller i produkter (Möller et al. 2022).
Klimatkompensation: Kompensera för utsläpp genom att betala för minskade utsläpp i en verksamhet som inte är kopplad till den aktivitet som kompenseras (Naturvårdsverket 2024c).
Utsläppsrätt inom EU ETS: Tillåten mängd utsläpp som säljs eller delas ut gratis till deltagarna (Naturvårdsverket 2024e). Varje utsläppsrätt motsvarar 1 ton CO_2.

Biochar Carbon Removal, BCR: Metoden att skapa kolsänkor från biokol och slambiokol benämns *Biochar Carbon Removal* (BCR) (Carbonfuture 2024). BCR räknas till kategorin teknikbaserad, borttagande/nedlåsande åtgärd (Senken 2024).
BCR-kredit: De certifierade och säljbara krediter som skapas genom BCR och säljs på den frivilliga marknaden för klimatkompensation kallar vi för BCR-krediter.

6.2 När uppstår kolsänkan från slambiokol?

Kolsänkan uppstår först i skedet när slambiokolet hanterats på ett sådant sätt att det inte kan återgå som CO_2 till atmosfären inom, vad EBC benämner som, rimliga gränser (Schmidt et al. 2024). Olika certifieringsstandarder kan ställa krav på hur slambiokolet får användas, men framför allt läggs ett stort ansvar på användaren att säkerställa att slambiokolet till exempel inte eldas upp. Om slambiokolet sprids på åkermark eller blandats in i en urban jord anses det att kolsänkan har uppstått. Det finns naturligtvis en risk att en brand i jorden skulle kunna eliminera kolsänkan, men denna risk ses som mycket liten och därmed inte inom rimliga gränser. I det fall som slambiokolet först skulle säljas till en jordproducent som blandar in det i jord som i sin tur säljs vidare till slutanvändare, anses kolsänkan uppstå vid den första inblandningen hos jordproducenten (Carbonfuture 2023). Skulle slambiokolet användas för att skapa filter så har inte en kolsänka uppstått förrän filtermaterialet använts på ett sådant sätt att det utgör en kolsänka. Vid inblandning av slambiokol i material, till exempel betong eller asfalt, anser man att en kolsänka har uppstått (Carbonfuture 2023). Kolsänkan uppstår alltså inte nödvändigtvis i samband med att slambiokolet producerats, vilket förtydligas i figur 6.1 nedan.

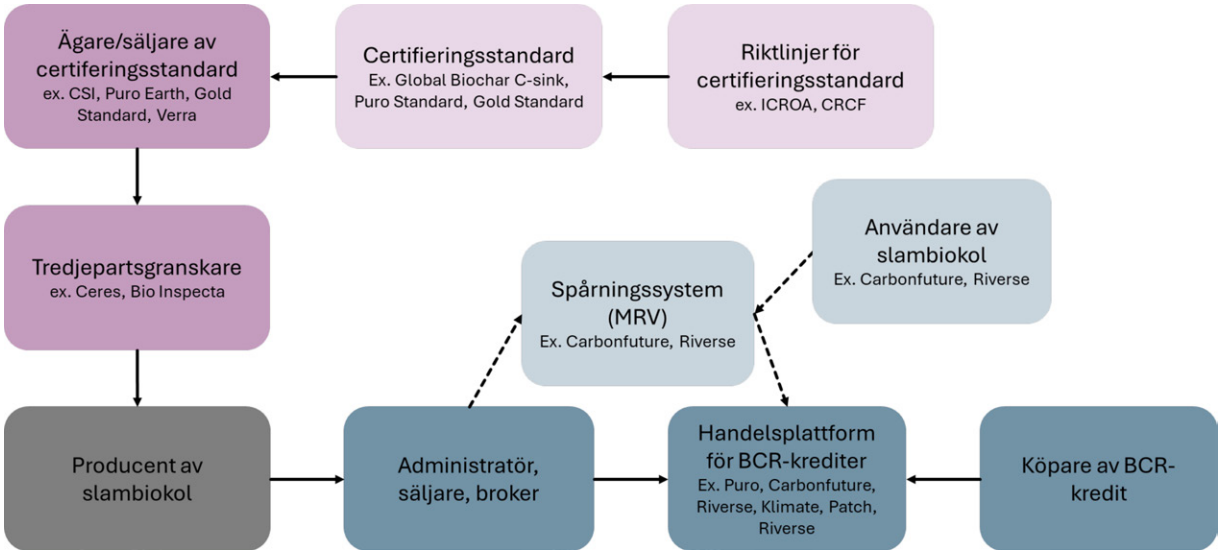


Figur 6.1
Kolsänkan från slambiokol uppstår först när den fysiska produkten använts på ett sådant sätt att kolet inte kan återgå som CO_2 till atmosfären.

Det är dock viktigt att göra skillnad på när kolsänkan har uppstått och när den kan säljas. BCR-krediter kan säljas i förtid innan själva kolsänkan har uppstått, men det är först när slambiokolet använts som kolsänkan klassas som ”levererad”.

6.3 Aktörer, samverkan och roller

Pyrolyserat avloppsslam består, som vi tidigare förklarat, av två separata produkter: den fysiska produkten slambiokol och den ”teoretiska” produkten BCR-kredit. Marknaden för handel med BCR-krediter har utvecklats under de senaste 5–10 åren (Puro.earth 2024a), och slambiokol kan i detta avseende inkluderas i det existerande regelverket för biokol. Även om slambiokol och relaterade BCR-krediter kan säljas på helt separata marknader är BCR-krediterna helt beroende av användningen av slambiokolet. Figur 6.2 illustrerar de inblandade aktörernas roller och hur de samverkar med varandra för att generera trovärdiga, spårbara och dokumenterade BCR-krediter. Notera att flera aktörer förekommer flera gånger i olika roller.



Figur 6.2
Samverkan mellan aktörer från slambiokol till säljbar BCR-kredit.

6.3.1 Ägare av certifieringsstandard och tredjepartsgranskare

Som beskrivits i avsnitt 4.6 finns en rad olika certifieringsstandarder som kan hantera BCR-krediter från slambiokol. Certifieringsstandarder kan i sin tur välja att följa de riktlinjer som ställs av den globala standarden för frivillighandel, ICROA (ICROA 2024). Ansvar och utveckling av certifieringsstandarderna utförs av ägarföretag. Slutligen anlitar ägarföretagen tredjepartsgranskare som bland annat utför granskning och revision som en del av certifieringsprocessen. De producenter som certifierar sina BCR-krediter har i huvudsak kontakt med tredjepartsgranskaren, men även ägaren av vald certifieringsstandard.

Under 2024 trädde ett provisoriskt regelverk inom EU i kraft med syfte att reglera certifiering av kolsänkor, det så kallade *Carbon Removals and Carbon Farming Regulation* (CRCF) (European Commission 2024). CRCF är nu under utveckling för att bli permanent och syftar till att skapa standarder för olika typer av kolsänkor för att likrikta hanteringen inom hela EU. Arbetet med att ta fram metodologier, utforma krav och verifiera befintliga certifieringsstandarder som uppfyller CRCF pågår. Den expertgrupp som är knuten till det projekt inom vilket denna rapport har tagits fram, påpekar att CRCF i kombination med EU:s klimatmål kan komma att ha stor inverkan på hur frivilligmarknaden utvecklas i och med att befintliga certifieringsstandarder kommer att behöva anpassa sig.

6.3.2 Producenter av slambiokol

I Sverige ägs infrastrukturen för avloppsrening av kommunerna. De kommunala VA-organisationerna ansvarar för driften av landets avloppsreningsverk även om det även finns exempel där privata aktörer anlitats för att sköta driften. Mottagare av avloppsslam kan däremot upphandlas fritt, vilket innebär att pyrolys av avloppsslam kan utföras av vilket upphandlat företag som helst.

Slambiokolsproducentens huvudsakliga uppgift relaterat till BCR-krediter är att producera ett slambiokol som uppfyller någon av certifieringsstandardernas krav (se avsnitt 4.6) för att generera certifierade BCR-krediter. De har dessutom möjlighet att påverka storleken på genererade BCR-krediter genom att sträva efter en effektiv pyrolysprocess med avseende på energi och kol (Puro.earth 2024d; EBC 2023).

6.3.3 Administratör, säljare, broker

För att generera och sälja BCR-krediter krävs administration och försäljning som kan utföras antingen av producenten själv eller en säljorganisation, s.k. *broker*. De administrativa systemen som används utvecklas löpande i takt med certifieringsstandarder och

marknaden, vilket gör att administrationen kan vara tidskrävande även om kompetensen sannolikt finns inom VA-organisationen.

För att skapa tillförlitlighet och dokumentation kring BCR-krediter kan ägare av certifieringsstandarder välja att koppla ett spårningssystem, s.k. MRV (Monitoring Reporting and Verification), till sin certifieringsstandard (Carbonfuture 2023). Spårningssystemet samlar det underlag som bedöms nödvändigt för att skapa trovärdighet för BCR-krediten och möjliggöra spårning. Slutligen utfärdas ett certifikat som kan säljas vidare. Exempel på underlag som kan efterfrågas av MRV är dokumentation från användaren av slambiokolet som intygar att det använts på ett sådant sätt att kolsänka uppstår och på vilken plats slambiokolet använts. Information om geografisk plats ger underlag för beräkning av utsläpp från transporter, vilka räknas bort från storleken på BCR-krediten.

6.3.4 Handelsplattformar

BCR-krediter säljs genom olika handelsplattformar, som antingen endast handlar med BCR-krediter eller olika typer av metoder att generera certifikat för klimatkompensation. Dessa handelsplattformar kan antingen sälja BCR-krediter mot ett arvode eller enbart användas som ”skyltfönster” där säljaren själv sköter all försäljning men betalar en administrativ avgift. Om säljaren själv har egna köpare skulle försäljning kunna ske direkt utan inblandning av handelsplattform beroende på köparens krav på dokumentation och spårbarhet.

6.3.5 Köpare av BCR-krediter

BCR-krediter och den fysiska produkten säljs separata från varandra på helt skilda marknader. Det är viktigt att påpeka att har man köpt slambiokol har man därmed endast köpt den fysiska produkten utan BCR-kredit. Om vi ser till BCR-krediter från biokol (ej slambiokol) så säljs även biokol i de allra flesta fall separat från krediten, men det finns undantag. Exempelvis så säljer jordföretaget Biokolprodukter rent biokol eller blandade biokoljordar inklusive BCR-kredit, vilket efterfrågas framför allt av städer och byggbolag (Biokolprodukter 2022). Om betalningsvilja för den positiva klimateffekten hos slambiokol uppstår hos potentiella användare skulle detta även kunna vara en möjlighet för slambiokol.

De största köparna av BCR-krediter globalt är när denna rapport skrivs Microsoft, Frontier Buyers, Airbus och Amazon. Microsoft är den enskilt största köparen med ca 74 % av alla köpta BCR-krediter (CDR.fyi 2024). Dessa företag har betydande klimatavtryck, och en verksamhet med begränsade möjligheter att nå klimatneutralitet. Generellt ser köpare av BCR-krediter detta som en viktig del i sitt varumärkesbyggande arbete och deras krav om spårbarhet och dokumentation påverkar branschen. Det bör dock noteras att det faktum att en enskild aktör köpt upp 74 % av alla BCR-krediter visar hur liten, omogen och sårbar marknaden fortfarande är. Som VA-organisation som genererar BCR-krediter finns därmed ett stort värde i att aktivt hitta nya köpare av BCR-krediter för att motverka osäkerheten på marknaden.

Intresset för kolkrediter ökar och många intressenter lyfter vikten av lokal anknytning och trovärdighet, men kunskapen om just BCR-krediter är fortsatt låg bland annat eftersom systemet bakom är komplext. Därmed finns en stor möjlighet för VA-organisationen att hitta kunder genom ett tydligt kommunikationsarbete.

Producenter kan även välja att tillgodoräkna sig den genererade kolsänkan till sitt eget klimatarbete, vilket skulle vara ett alternativ för bland annat kommunala VA-organisationer. Svenskt Vatten har startat initiativet ”Klimatneutral VA-bransch” där målet är att den totala gemensamma klimatpåverkan ska vara netto-noll (Svenskt Vatten 2024b). Detta vägval måste dock vägas mot uteblivna intäkter, vilket därmed finansieras av VA-taxan, i kombination med behovet av alternativa metoder att nå sina klimatmål. Vi återkommer till detta vägval i avsnitt 9.4.5.

6.4 Beräkna storlek på BCR-kredit

Hur storleken på BCR-krediter beräknas skiljer sig åt mellan olika certifieringsstandarder och utgör dessutom en ständigt pågående diskussion mellan olika branschaktörer. Nedan ger vi en bild av vilka aspekter som de största certifieringsstandarderna tar hänsyn till i sina beräkningsmodeller.

6.4.1 Teoretisk startpunkt

Den maximala kolsänkan som ett ton slambiokol rent teoretiskt skulle kunna utgöra är 3,67 ton CO_2-ekvivalenter, då med det osannolika antagandet att slambiokolet innehåller 100 % kol. Denna siffra erhålls genom att beräkna förhållandet mellan molvikten för en kolatom och en CO_2-molekyl.

$$\frac{Molvikt\ CO_2}{Molvikt\ C} = \frac{(12 + 16 * 2)\ g/mol}{12\ g/mol} = \frac{44\ g/mol}{12\ g/mol} \approx 3{,}67$$

6.4.2 Kolhalt

Utifrån 3,67 tar man hänsyn till slambiokolets kolhalt och räknar därmed bort den andel som inte utgörs av organiskt kol, C_{org}. Puro bedömer även att eventuell andel kol från fossila källor, genom slammets innehåll av kemikalier och plaster, ska räknas bort (Azzi 2024, pers.kom.). Kolhalten i slambiokol bestäms genom analys och som vi visat tidigare varierar kolhalten i olika slambiokol (se avsnitt 3.1.3).

6.4.3 Nedbrytningstakt

Bedömningen av nedbrytningstakt för slambiokolet, och därmed minskning av storleken på kolsänkan, samt vilken tidsperiod som används, skiljer sig åt mellan olika certifieringsstandarder. Puro beräknar kolsänkan över en 100-årsperiod och tar även hänsyn till påverkan från i vilken klimatzon som slambiokolet används (Puro.earth 2024e) medan EBC Global Biochar C-sink i sin senaste uppdatering gått från ett 100-årsperspektiv till ett 1000-årsperspektiv (Schmidt et al. 2024). EBC Global Biochar C-sink beräknar att 75 % av kolet, den permanenta fraktionen, kvarstår efter 1000 år och att resterande 25 %, den semi-permanenta fraktionen, förväntas brytas ned under den inledande 1000-årsperioden. Global Biochar C-sink inkluderar därmed endast den permanenta fraktionen i den säljbara BCR-krediten (Schmidt et al. 2024).

Hur storleken på nedbrytningen ska beräknas utgör en pågående diskussion i branschen mycket på grund av studier på inertinit utförda av ett danskt forskarlag (Sanei et al. 2024). Inertinit beskrivs som den mest stabila kolstrukturen i jordskorpan och kan därför användas som ett riktmärke vid uppskattning av kolföreningars permanens. Det danska forskarlaget menar att nedbrytningen av kolstrukturen är mycket mer begränsad än vad biokolbranschen tidigare utgått från. Både Global Biochar C-Sink och Riverse har anammat inertinitperspektivet av de senaste uppdateringarna av metodologier (Schmidt et al. 2024; Riverse 2024a) Representanter i expertgruppen uttrycker att detta synsätt skulle kunna ha en betydande påverkan på handeln av BCR-krediter eftersom det skulle resultera i att beräknad BCR-kredit per mängd slambiokol ökar, precis som konkurrenskraften mot andra typer av kolsänkor med lång tidshorisont.

6.4.4 Utsläpp från hantering och transport

En grundläggande del i certifieringsarbetet är att beskriva hur processen från ingående material till pyrolys och färdigt slambiokol ser ut. Utsläpp som uppkommer på grund av hantering och bearbetning av både slam och slambiokol inkluderas i beräkningen och bidrar till att minska den slutliga BCR-krediten.

Utsläpp från transporter av slambiokolet beräknas utifrån information om geografisk placering på det intyg som användaren av slambiokolet utfärdat. Denna beräkning görs av vald spårningstjänst, så kallad MRV (Measurement, Reporting and Verification). I det fall som beskrevs ovan där en jordproducent blandar in slambiokolet i en jord som säljs vidare, beräknas vanligtvis endast utsläpp från transporter till jordproducenten.

6.4.5 Exempelberäkning

Sammanfattningsvis kan storlek på BCR-krediter beräknas genom formeln:

*BCR-kredit = 3,67 * kolhalt * andel kvar efter vald tidsperiod – utsläpp hantering – utsläpp transport*

Med tanke på att vi inte kan sätta någon generell siffra på påverkan från hantering och transporter beräknar vi nedan den maximala storleken på BCR-kredit för ett slambiokol producerat i en industriell pyrolysanläggning enligt Global Biochar C-sinks standard. Enligt samlad bedömning av kolhalt i Tabell 3.1 sätts kolhalt till 30 % och andel kvar efter vald tidsperiod till 75 % enligt Global Biochar C-sink (Schmidt et al. 2024).

Syftet med detta exempel är att ge en storleksordning snarare än exakta värden. Notera att eventuell andel fossilt kol inte har räknats bort.

*BCR-kredit = 3,67 * 0,3 * 0,75– utsläpp hantering – utsläpp transport*
= 0,83 – utsläpp hantering - utsläpp transport

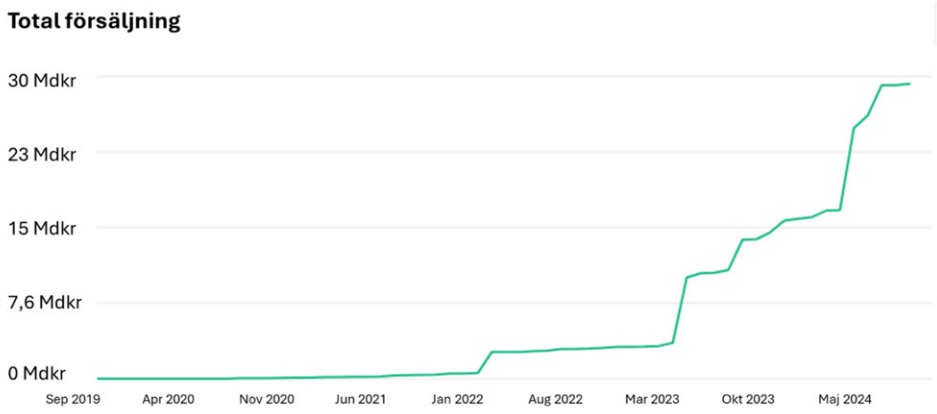
Detta ger att 1 ton slambiokol ger upphov till ca 0,8 ton CO_2-ekvivalenter innan utsläpp från hantering och transport gjorts och förutsatt att kvoten H/C_{org} <0,4. Denna siffra ska dock tas som en fingervisning eftersom specifika slambiokols kolhalt varierar. I Tabell 6.1 visas resultatet av samma beräkning men för andra värden på kolhalt.

Kolhalt slambiokol	20 %	35 %	45 %
BCR-kredit (ton CO_2/ton slambiokol)	0,6	1,0	1,2

Tabell 6.1
Slambiokolets kolhalts påverkan på BCR-kreditens storlek innan utsläpp från hantering och transport.

6.5 Prisläge och prispåverkande faktorer

Marknaden för BCR-krediter växer globalt. Figur 6.3 visar att under perioden september 2019 till september 2024 har BCR-krediter motsvarande ca 11 miljoner ton CO_2-ekvivalenter till ett värde av 2,7 miljarder USD sålts globalt (CDR.fyi 2024).



Figur 6.3
Ackumulerat försäljningsvärde för BCR-krediter september 2019 – september 2024 (CDR.fyi 2024). Grafen är översatt från engelska och valutan ändrad från USD till SEK.

Expertgruppen lyfter att prisbilden på BCR-krediter har varierat kraftigt sedan starten år 2019. Under en period om knappt 3 månader, mellan september och december 2024, anger CDR.fyi att spotpris för BCR-krediter gick från 130 USD/ton CO_2 till 170 USD/ton CO_2 (CDR.fyi 2024).

Puro är den handelsplattform som genererar störst mängd försäljningar av BCR-krediter, följt av Carbonfuture (CDR.fyi 2024). Även om prisbilden för BCR-krediter är konkurrenskraftig mot alternativa tekniker lyfter expertgruppen det riktmärke om 100 USD/ton som förutspås vara en brytpunkt för att BCR-krediter ska växa utanför de exklusiva kundgrupper som driver marknaden nu. Jämför vi med priset för auktionerade utsläppsrätter så låg priset under 2023 mellan 66 och 96 euro med ett medelpris på 83 euro/ton CO_2, vilket är en ökning sedan 2022 (Naturvårdsverket 2023b).

World Economic Forum lyfter potentialen hos biokol (not. slambiokol nämns inte separat) med fokus på biokolets stabilitet och dess fördelar utöver kolsänkan (World Economic Forum 2023). De pekar också på kolsänkans ekonomiska värde som en pusselbit för att accelerera utbyggnaden av biokolbranschen. Precis på samma sätt som för biokol så är tillgängligheten på BCR-krediter från slambiokol direkt kopplad till mängden producerad och korrekt använt slambiokol, vilket ytterligare understryker vikten av en etablerad marknad för det fysiska materialet. Vid ett tillräckligt högt pris på BCR-krediter kan långtidslagring utan specifik användning, s.k. deponering, av slambiokol motiveras ur ett ekonomiskt perspektiv, men detta innebär att värden såsom recirkulering av näringsämnen och andra potentiellt positiva egenskaper i olika applikationer uteblir.

Till skillnad från system för handel med utsläppsrätter påverkas den frivilliga handeln med BCR-krediter av andra marknadskrafter. Det faktum att köparen vill nyttja BCR-krediter i sin kommunikation och varumärkesbyggande arbete ställer ofta även krav på de kompletterande värden som kommer med kolsänkan. BCR-certifikatet gynnas av att paketeras med en ”story” som beskriver antingen produktionen, användningen eller mervärden på ett sådant sätt att det gynnar köparen. Exempel på detta är småskalig biokolproduktion i utvecklingsländer som leder till ökad sysselsättning och gynnar lokal matförsörjning. Ett högre mervärde kring BCR-krediter kan motivera ett högre pris.

De diskussioner som pågår kring hur länge biokolet och slambiokolet utgör en kolsänka, det vill säga dess permanens kan vara mycket viktiga för hur marknaden för BCR-krediter utvecklas. Expertgruppen lyfter att det finns kundgrupper som aktivt valt bort BCR-krediter eftersom de uppfattat kolsänkan som för kortsiktig med tanke på 100-årsperspektivet som fortfarande anammas av vissa aktörer. Ett klargörande och enighet kring biokolets permanens samt tydligare kommunikation mot marknaden skulle kunna bidra till ökad efterfrågan på BCR-krediter.

Företag och organisationer som utsätts för ökande krav från marknaden och även nya regelverk att minska sin klimatpåverkan kan öka efterfrågan på kolsänkor och därmed påverka priset på BCR-krediter. Parallellt kan utbyggnaden av annan teknik

för klimatkompensation, såsom till exempel Bio-Energy Carbon Capture and Storage (BECCS) och Direct Air Carbon Capture and Sequestration (DACCS), pressa priset nedåt. Eftersom marknaden för BCR-krediter är global är även konkurrensen det. Uppbyggnaden av BCR-projekt i utvecklingsländer går snabbt framåt och med lägre kostnader kan dessa pressa ned priserna på BCR-krediter.

Samtidigt finns en efterfrågan på kolsänkor som skapas i köparens geografiska närhet, vilket kan ge acceptans för högre priser på BCR-krediter från Norden. Även den tekniska utvecklingen och erfarenheten av pyrolysanläggningar bör påverka priset på BCR-krediter. Tack vare att pyrolys av avloppsslam genererar flera produkter kan producenter kombinera priserna för dessa på olika sätt. Exempelvis skulle högre priser på BCR-krediter kunna tillåta lägre priser/högre kvittblivningskostnad för slambiokolet och därmed öppna upp nya användningsområden, vilket i sin tur leder till ökad användning av den fysiska produkten och därmed fler säljbara BCR-krediter.

7 Additionalitet relaterat till BCR-krediter

I följande avsnitt redogör vi för begreppet additionalitet och hur det inverkar på generering och försäljning av BCR-krediter.

7.1 Begreppet

WWF beskriver begreppet additionalitet som följer:
In the context of crediting mechanisms, emission reductions or removals from a mitigation activity are additional if the mitigation activity would not have taken place in the absence of the added incentive created by the carbon credits. (WWF 2020)

Förenklat kan man avgöra om en klimatåtgärd är additionell genom att ställa frågan ”Skulle ett projekt uppstått oavsett om drivkrafter skapade av handelssystemet fanns, eller inte?” (fri översättning från engelska) (Trexler et al. 2006). Additionalitet syftar till att säkerställa att pengar som investeras i klimatkompensation utgör en reell skillnad eftersom åtgärden annars inte hade genomförts (Forbes 2022), men begreppet har kritiserats eftersom bedömningen är subjektiv (Salzman & Weisbach 2024). Bedömningen om ett projekt är additionellt, eller inte, kan göras genom en projektspecifik eller standardiserad ansats (Broekhoff et al. 2019). En standardiserad ansats är ett antal kriterier som man anser uppfyllda eller inte för en specifik typ av åtgärd, exempelvis vindkraft eller återbeskogning. Vid en projektspecifik ansats bedöms varje projekt individuellt enligt följande kriterier:

- Det saknas *legala* krav på att åtgärden ska genomföras och det finns alternativ till projektet som uppfyller lagar och regler (CDB Executive board 2012).
- Åtgärden är inte det *finansiellt* mest fördelaktiga jämfört med alternativ och är inte lönsamt utan intäkter från klimatkompensation (CDB Executive board 2012).
- En barriäranalys visar att det finns minst en *barriär* för att genomföra projektet och att minst ett alternativ till projektet är genomförbart utan att hindras av sociala, institutionella eller tekniska barriärer (exkl. ekonomiska hinder).
- Åtgärden ses inte som *standard* eller skiljer sig från åtgärder som ses som standard (Broekhoff et al. 2019).

För att illustrera ett exempel kan man motivera att återplantering av skog efter avverkning i Sverige inte är en additionell klimatåtgärd eftersom det finns finansiella incitament att återplantera för att säkra framtida ekonomiska värden och det finns legala krav på återplantering (Sveriges riksdag 1979).

7.2 Inverkan och risker

Nedan berör vi begreppet additionalitet kopplat till pyrolys av avloppsslam genom att analysera kriterierna för additionalitet som presenterades ovan. Med utgångspunkt i UNFCCC:s (United Nations Framework Convention on Climate Change) vägledning för bedömning av additionalitet (CDB Executive board 2012) är det tydligt att det finns en betydande komplexitet som omger begreppet. En bedömning av huruvida pyrolys av avloppsslam är additionellt görs av vald certifieringsstandard. Ingen av de kontaktade certifieringsorganen har, då rapporten skrevs, redogjort för att de har certifierat

BCR-krediter från slambiokol varför det saknas konkreta additionalitetsbedömningar att ta del av.

7.2.1 Det legala kriteriet

Det finns alternativa metoder för hantering av avloppsslam som uppfyller legala krav och i dag finns inga krav i svenskt eller europeiskt regelverk på att avloppsslam ska pyrolyseras. Hållbar slamhantering (SOU 2020:3) lyfter dock pyrolys som ett gångbart alternativ för hantering av avloppsslam och enligt Naturvårdsverket finns det en möjlighet att EU-kommissionen i sitt arbete att se över EU:s slamdirektiv kan ställa krav på olika hanteringsmetoder för avloppsslam, däribland pyrolys (Bose 2024, pers.kom.). Samtidigt nämner Naturvårdsverket att EU brukar vara bra på att inkludera skrivelser som reglerar oönskade sidoeffekter, vilket uppfyllandet att additionalitet skulle kunna vara. Skulle det komma legala krav som exempelvis innefattar att avloppsslam ska behandlas genom pyrolys finns en risk att det legala additionalitetskriteriet inte uppfylls, men vi bedömer denna risk som mycket osannolik. Så länge som kravet föreslår flera olika tekniker som konkurrerar mot varandra kan man motivera att det legala kriteriet uppfylls (Azzi 2024, pers.kom.). Expertgruppen lyfter att skulle det komma krav på termisk behandling där pyrolys är ett av flera alternativ, kan detta påverka storleken på den säljbara BCR-krediten om skillnaden ur ett klimatperspektiv till andra alternativ blir mindre.

7.2.2 Det finansiella kriteriet

Det finansiella kriteriet ska avgöra om investeringen är mindre finansiellt attraktiv än minst ett annat alternativ om inte intäkter från kolkrediter räknas in (CDB Executive board 2012). De ekonomiska förutsättningarna för pyrolys av avloppsslam beror bland annat på val av pyrolysteknik och affärsmodell för den specifika producenten, varför en generell bedömning av det finansiella kriteriet är svår att göra. För att bedöma vikten av intäkter från BCR-krediter måste vi se dem i relation till övriga potentiella intäktsströmmar. Förhållandet mellan de olika intäktskällorna beskrivs i avsnitt 9.3.

7.2.3 Kriteriet om barriärer

I utvärderingar av alternativa tekniker för att hantera avloppsslam lyfts nackdelar med olika metoder (SOU 2020:3), vilka kan ses som barriärer. Utgår vi från pyrolys lyfts utebliven recirkulering av näringsämnet kväve såväl av utredningar som av intervjuade lantbrukare jämfört med beprövat alternativ att sprida slam. Med nuvarande kunskapsläge där kvarvarande fosfors växttillgänglighet inte är fastställd uppkommer även skepsis mot slambiokol, vars avsättning är en förutsättning för pyrolys av avloppsslam. Att erfarenheten av pyrolysteknik är mycket begränsad inom den svenska VA-branschen bedöms också som en barriär som inte hindrar beprövade tekniker. Enligt UNFCCC:s vägledningen för bedömning av additionalitet behöver inte barriärkriteriet bedömas om det finansiella kriteriet inte uppfylls (CDB Executive board 2012).

7.2.4 Kriteriet om standard

Bedömningen av huruvida pyrolys kan anses som standard ur ett additionalitetsperspektiv ska göras enligt UNFCCC:s vägledning (CDM Executive Board 2015) där hänsyn tas till geografiskt område, typ av åtgärd för att minska klimatpåverkan, utmatade produkter/avfall och typ av teknik.

Intresset för pyrolys av avloppsslam är stort både i Sverige och inom EU, men än finns endast ett mindre antal industriella anläggningar i drift (Wieth 2024, pers.kom.; Reichardt 2024, pers.kom.). Pyrolys av avloppsslam bör därmed inte ses som standard och avviker från alternativa metoder för hantering av avloppsslam bland annat med tanke på teknik, utmatade produkter/avfall.

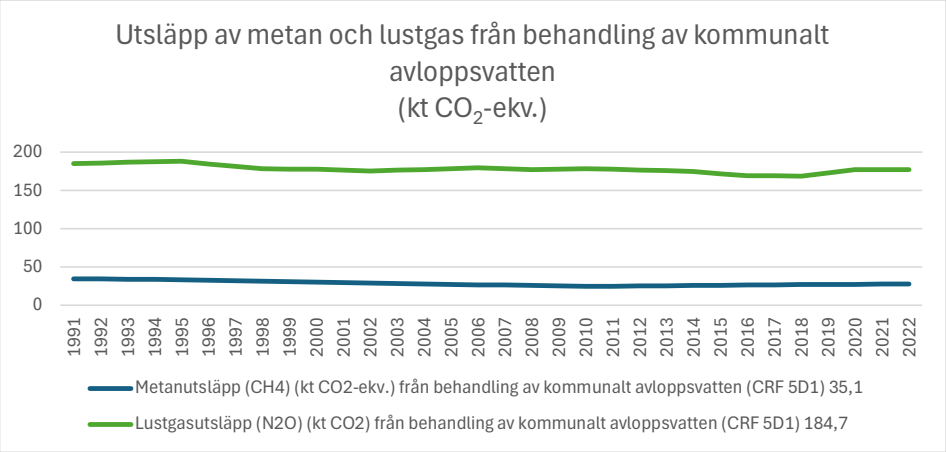
7.2.5 Slutsats om additionalitet

Nuvarande bedömning är att det finansiella kriteriet skulle kunna utgöra en risk beroende på hur ekonomin ser ut för det specifika slampyrolysprojektet. Verksamheten kring avloppsrening, oavsett metod, är inte finansiellt attraktiv då den finansieras genom VA-taxan (Sveriges riksdag 2006) men i och med potentiella intäktsflöden vid pyrolys kan det finnas exempel när pyrolys är mer ekonomiskt fördelaktigt än andra alternativ oavsett om intäkter från BCR-krediter inkluderas eller ej. Det finns även osäkerheter kring flera kriterier där jämförelser görs mot alternativ. Ur en VA-organisations perspektiv ser vi att alternativ till pyrolys är andra metoder för att hantera avloppsslam medan vägledningen stundtals ger intrycket av att alternativen främst är andra metoder för att minska utsläpp eller skapa kolsänkor.

Det som i slutändan avgör om ett projekt är additionellt eller inte är den certifieringsstandard som nyttjas. Puro följer riktlinjer från ICROA och gör en bedömning av om de olika kriterierna beskrivna ovan uppfylls för varje enskilt projekt med avseende på additionalitet (Puro.earth 2024b) och förutspår att detta borde bli en av punkterna som berörs av EU:s kommande CRCF-regelverk. Även EBC gör en separat bedömning av additionalitetsbegreppet enligt ICROA:s riktlinjer (Hafner 2024, pers.kom.). Dras paralleller till biokol och BCR-krediter så har, oss veterligen, additionalitetsbegreppet inte utgjort något hinder. Vår bedömning är därför att risken är liten för att additionalitet ska utgöra ett hinder för BCR-krediter från slambiokol. Samtidigt utgör det geografiska området en viktig parameter då projektet jämförs med alternativ (CDM Executive Board 2015), varför en slutlig bedömning av additionalitet för slampyrolys först kan dras med säkerhet när en första producent i Sverige är certifierad.

8 Certifiering av minskade utsläpp av metan och lustgas

Metan (CH_4) och lustgas (N_2O) utgör växthusgaser med 28 respektive 265 gånger så stor uppvärmningspotential (GWP-värde) som koldioxid (CO_2) (Naturvårdsverket,2024a). Utsläpp av metan och lustgas från rening av avloppsvatten utgör en källa till utsläpp både under reningen och under behandling och användning av avloppsslam. Åtgärder för att minska dessa utsläpp är därmed av stort värde. I Figur 8.1 visas de utsläpp av metan och lustgas från behandling av kommunalt avloppsvatten i Sverige under åren 1990–2019 som sammanställts av Statistiska Centralbyrån (2023).



Figur 8.1
Utsläpp av metan och lustgas från behandling av kommunalt avloppsvatten i Sverige utifrån data från Statistiska Centralbyrån (2023).

Ur ett kolkreditperspektiv berör vi i avsnitten nedan kategorin *undvikande/reducerande* genom potentialen att uppnå minskade utsläpp av växthusgaser, vilket skiljer sig från kategorin *borttagande/nedlåsande* som vi behandlat genom BCR-krediter ovan.

8.1 Minskade utsläpp vid slampyrolys

Svenskt Vatten driver initiativet Klimatneutral VA-bransch (Svenskt Vatten 2024c) med fokus mot klimatneutralitet år 2030. Inom initiativet har ett klimatberäkningsverktyg för VA-anläggningar (2024b) utvecklats. Verktyget listar de potentiella utsläpp av växthusgaser som VA-organisationer ska kvantifiera men inkluderar i dag inte slambiokol. Nedan listar vi de utsläppskällor från klimatberäkningsverktyget som vi bedömer kan påverkas genom integrering av pyrolys inom avloppsreningsverket:

El- och värmeförbrukning
Om pyrolysprocessen genererar överskottsvärme skulle denna kunna ersätta annan värmeproduktion. Beroende på hur denna värme genererats kan det innebära minskade utsläpp, till exempel vid substitution av fossila bränslen. Pyrolysprocessen genererar också den utsläpp av främst koldioxid. Samtidigt kan verksamhetens elförbrukning öka, beroende på val av pyrolysprocess.

Transporter av insatsvaror och restprodukter
Om ett avloppsreningsverk installerar en pyrolysanläggning som kräver insamling av externt avloppsslam för att tillgodose anläggningens kapacitet kan det leda till ökade

utsläpp från transporter till reningsverket. Samtidigt innebär det att man genom pyrolysprocessen inklusive torkning reducerar mängden avloppsslam med ca 90 % vilket leder till minskade utsläpp från transporter av slambiokol i stället för avloppsslam från reningsverket.

Restprodukter

Beroende på tidigare hantering av avloppsslammet kan pyrolys till slambiokol innebära minskade utsläpp. Jämfört med till exempel spridning av avloppsslam, deponitäckning eller jordtillverkning kommer pyrolys till slambiokol att innebära minskade utsläpp från nedbrytning av avloppsslammet.

Klimatverktyget värderar även nyttor från biprodukter, vilket bland annat inkluderar recirkulering av näringsämnen. Om slambiokol inkluderas i verktyget innebär det att nyttan från recirkulering av kväve skulle minska vid pyrolys om man jämför med spridning av avloppsslam på åkermark. Jämför man däremot med slamförbränning utan fosforåtervinning ökar nyttan vid pyrolys. Värdet av slambiokolets nytta som kolsänka eller potential att minska föroreningar eller eventuellt ersätta mineralgödsel är inte inkluderat i verktyget ännu.

Direkta utsläpp av metan och lustgas hos avloppsreningsverk

Slamhygienisering, till exempel genom lagring, är inte lagstadgat i Sverige (Johannesdottir et al. 2023), men Revaq ställer krav på hygienisering, till exempel genom sex månaders lagring, för spridning av avloppsslam på åkermark (Revaq 2024). Eftersom pyrolys uppfyller kraven för hygienisering (Johannesdottir et al. 2023) uteblir lagringen av avloppsslammet. Lagringen kan göras på avloppsreningsverket, ute hos annan aktör eller en kombination av båda. Lagring av avloppsslam utgör en källa till utsläpp av såväl metan som lustgas, varför pyrolys medför en utsläppsminskning som kan tillgodoräknas VA-organisationen.

Utsläppsminskningar och kolsänkor är inte samma sak. En av rapportens frågeställningar är dock om minskade utsläpp av metan och lustgas ur ett administrativt perspektiv kan bidra till att öka storleken på genererad BCR-kredit och därmed göras säljbar.

8.2 Kan utsläpp av metan och lustgas inkluderas i BCR-kredit?

Frågan i rubriken är ställd utifrån ett administrativt perspektiv och svaret tar därmed inte hänsyn till huruvida det är tekniskt möjligt att mäta eller beräkna den potentiella klimateffekten från utsläpp av metan och lustgas, i likhet med den process som sker för kvantifiering för BCR-krediten (se avsnitt 6.4).

Certifieringsstandarderna Global Biochar C-sink och Puro hanterar endast kolkrediter inom kategori borttagande/nedlåsande och har därmed ingen metodologi för utsläppsminskningar (Hafner 2024, pers.kom.; Azzi 2024, pers.kom.). Inom Puro kan man dock lyfta fram positiva bieffekter, kopplade till FN:s hållbarhetsmål, som uppkommer till följd av pyrolysen. Dessa positiva bieffekter påverkar inte storleken av genererad BCR-kredit, men kan vara positivt i marknadsföringssyfte (Azzi 2024, pers.kom.).

Gold Standard är en certifieringsstandard som har metodologier för såväl biokol som utsläppsminskningar. De meddelar att de inte har någon kombinerad metodologi som inkluderar samtliga klimateffekter från pyrolys av avloppsslam, men att det går att ansöka om att en ny metodologi tas fram (Heron 2024, pers.kom.). Med hänsyn till konkurrensen till alternativa klimatkompensationsprojekt uttrycker expertgruppen dock tvivel till att krediter från utsläppsminskning av metan och lustgas från avloppsvattenrening skulle vara eftertraktade.

Däremot lyfter expertgruppen att VA-organisationen i stället kan tillgodoräkna sig

de minskade metan- och lustgasutsläppen i arbetet med att kvantifiera verksamhetens klimatpåverkan. Denna positiva påverkan på verksamhetens klimatavtryck uppstår oavsett om BCR-krediten säljs vidare eller behålls inom organisationen (Azzi 2024, pers. kom.). Expertgruppens slutsats är därmed att klimatkompensation från de två huvudkategorierna *undvikande/reducerande* (eng. avoidance/reduction) och *borttagande/nedlåsande* (eng. removal/sequestration) inte kan kombineras och därmed bidra till varandras klimatkompensationscertifikat, men att båda har ett värde på egen hand.

9 Bör svenska VA-organisationer pyrolysera avloppsslam?

Avloppshantering klassas som en samhällsviktig verksamhet (MSB 2022). Uppdraget utförs av våra svenska VA-organisationer som strävar efter att huvudsakligen finansiera verksamheten genom den medborgarbetalda VA-taxan (Svenskt Vatten 2024a). Vattentjänstlagen innehåller regler och krav relaterat till avgifter och skriver uttryckligen att ”Avgifterna får inte överskrida det som behövs för att täcka de kostnader som är nödvändiga för att ordna och driva va-anläggningen” (Sveriges riksdag 2006). VA-verksamheten styrs även av de lagar och riktlinjer som beskriver hur avloppsvatten ska renas och vilka gränsvärden som gäller för att säkra avsättning för slammet (se kapitel 4). Sist men inte minst ökar insikten om att hela samhället måste ställas om med fokus på att minska vår påverkan på klimatet, vilket bland annat realiseras genom Svenskt Vattens initiativ Klimatneutral VA-bransch 2030 (Svenskt Vatten 2024c). För att besvara frågan *“Bör svenska VA-organisationer pyrolysera slam?”* närmar vi oss denna frågeställning i rapporten utifrån tre centrala perspektiv: miljö, klimat och ekonomi.

9.1 Slampyrolys ur ett miljöperspektiv

Med hänvisning till *Bilaga A Jämförelse mellan slambiokol och befintliga alternativ* där avloppsslam och slambiokol jämförs med avseende på föroreningar anser vi att det finns argument för att pyrolys kan motiveras ur ett miljöperspektiv. Den forskning som finns om pyrolysens påverkan på PFAS, mikroplaster, läkemedelsrester samt vissa tungmetaller under högre pyrolystemperatur är så pass likriktad att potentialen motiverar pyrolys som en metod att hantera dessa föroreningar i avloppsslam. Som beskrivits i kapitel 4 väntas nya regelverk kopplade till slamhantering på såväl nationell som europeisk nivå. Nya lagkrav som exempelvis skulle kunna beröra PFAS, mikroplaster och läkemedelsrester eller restriktioner som försvårar slamspridning samt befintliga krav på hygienisering kan skapa argument för pyrolys som behandlingsmetod. Pyrolysen är dessutom en metod som möjliggör nedlåsning av en andel av det kol och recirkulering av en andel näringsämnen som finns i avloppsslammet, vilket beskrivits i avsnitt 3.1. Pyrolys utgör även en teknik för hygienisering av avloppsslam med syfte att reducera mängden patogener (Johannesdottir et al. 2023).

Det finns dock betydande kunskapsluckor som kräver ytterligare forskning kring pyrolysens effekter på tungmetaller och näringsämnens växttillgänglighet, samt slambiokolets långsiktiga funktion i olika applikationer. Detta är särskilt viktigt med tanke på de koncentrerade tungmetallhalterna. Frågor som rör näringsämnens växttillgänglighet på både kort och lång sikt, samt hur starkt kvarvarande föroreningar är bundna i slambiokolet (avsnitt 3.13.1), är avgörande för att säkerställa en hållbar användning och avsättning för materialet, inklusive dess potentiella värde som gödselmedel. Även om laboratorieförsök ger värdefulla insikter, är det nödvändigt att komplettera dessa med storskalig produktion och praktisk tillämpning för att bättre förstå slambiokolets marknadspotential och funktion i verkliga miljöer. Med tanke på indikationen i Tabell 4.2 som visar att tungmetallhalten i vissa slambiokol kan överstiga godkända gränsvärden som gäller slamspridning på åkermark behöver man även ha andra användningsområden i åtanke.

Pyrolysprocessen inklusive torkning är även ett sätt att minska mängden avfall med avseende på både volym och vikt, vilket minskar resursbehov för hantering och transport. Vid TS-halt på 25 % i slammet kan fem av sex transporter av materialet elimineras med

avseende på volym (Pyreg 2020), och räknar man på vikt kan en reduktion på upp till 90 % uppnås, vilket i sin tur minskar både transportkostnader ut från anläggning och utsläpp (Bahr 2016). Om avloppsreningsverket däremot behöver ta emot avloppsslam från andra avloppsreningsverk för att fylla pyrolysanläggningens kapacitet kan mängden transporter öka. Hur stor reduktionen av volym eller vikt blir varierar dock beroende på teknisk process och hantering av slambiokolet.

Slutsatsen är därför att pyrolys av avloppsslam kan motiveras ur ett miljöperspektiv men att det fortsatt finns omfattande behov av kompletterande forskning och erfarenhet.

9.2 Är slampyrolys motiverat ur ett klimatperspektiv?

Studier visar att lagring och spridning av avloppsslam genererar klimatpåverkande emissioner (Bahr 2016; Jönsson et al. 2015). Genom att pyrolysera slam kan dessa utsläpp reduceras (Thomsen 2018), men det kan behövas NO_x-rening eller annan rökgasrening vid pyrolysen. En jämförande livscykelanalys (LCA) av traditionella behandlingsmetoder jämfört med pyrolys av avloppsslam, från Borås och Lidköping, drog slutsatsen att pyrolys hade stor potential som behandlingsmetod för avloppsslam med mindre klimatpåverkan (Hosseinian et al. 2024). En studie av IVL (Grundestam et al. 2020) visar att LCA för pyrolys är överlägsen ur ett klimatperspektiv jämfört med spridning av avloppsslam och en kombination av hydrotermisk karbonisering (HTC) och fosforåtervinning även när kolsänkan från BCR-krediter inte är medräknad. Det bör dock noteras att rapporten utgår från att 80 % av slambiokolets fosfor är växttillgänglig. En miljösystemanalys där alternativ för näringsförsörjning på åkermark jämförs ur ett energi- och klimatperspektiv visar att en kombination av avloppsslam och mineralgödsel är bäst ur ett energiperspektiv men att kombinationen slambiokol och mineralgödsel är bäst ur ett klimatperspektiv (Bahr 2016).

Som beskrivits i avsnitt 6.4 och kapitel 8 kan pyrolys av avloppsslam leda till minskade utsläpp av metan och lustgas och samtidigt generera certifierbara BCR-krediter. De minskade utsläppen inkluderas i Svenskt Vattens beräkningsmodell, som utgör ett verktyg till initiativet Klimatneutral VA-bransch till 2030 (Svenskt Vatten 2024c), och kan därmed räknas till VA-organisationens klimatarbete. Den kolsänka, BCR-krediter, som slampyrolys genererar är dock inte inkluderad i beräkningsmodellen ännu, men kan däremot certifieras enligt beskrivning i avsnitt 4.6 och kapitel 6.

Mot bakgrund av ovan nämnda studier och rapporter kan man argumentera för att det i dagsläget finns starka motiv för att pyrolysera avloppsslam ur ett klimatperspektiv.

9.3 Är slampyrolys motiverat ur ett ekonomiskt perspektiv?

Att slampyrolys är motiverat ur ett ekonomiskt perspektiv betyder inte nödvändigtvis att det är ekonomiskt lönsamt och genererar ett finansiellt överskott. Detta kan utgöra en avgörande skillnad mellan en kommunal VA-organisation och ett privat, vinstdrivet företag. Uppdraget att rena avloppsvatten görs inte primärt för att generera intäkter och den kommunala VA-organisationen kan inte välja huruvida de vill utföra uppdraget eller inte. Vi måste därmed utvärdera pyrolys av avloppsslam genom att jämföra vilken av alternativa behandlingsmetoder som resulterar i minst kostnader i stället för att bedöma den avgränsade investeringens lönsamhet, vilket är relevant för ett privat företag.

Om den eventuella merkostnad som pyrolys medför, jämfört med alternativa behandlingsmetoder för avloppsslam, är mindre än de eventuella ekonomiska mervärden som pyrolysen medför bedömer vi att pyrolys kan motiveras ur ett ekonomiskt perspektiv.

Merkostnad pyrolys ≤ Mervärde pyrolys

För att avgöra om påståendet ovan stämmer måste det benas ut vilka merkostnader och mervärden som kan uppkomma som en följd av pyrolys. Det är dock viktigt att komma ihåg att ekonomiska förutsättningar är unika för varje verksamhet och projekt varför vissa kostnads- respektive intäktsposter inte alltid kommer att vara relevanta.

Merkostnad pyrolys
= ökad investeringskostnad + ökad driftkostnad + utebliven intäkt (t.ex. biogas)

Mervärde pyrolys
= minskad kvittblivning + intäkt slambiokol + intäkt BCR-kredit + intäkt värme + mottagningsavgift slam

9.3.1 Merkostnad pyrolys

Den eventuella ökade investeringskostnaden uppkommer som ett resultat av valet att investera i pyrolys jämfört med aktuella alternativ, vilka kommer skilja sig åt för olika VA-organisationer. Den ökade investeringskostnaden kan beräknas som en årlig avskrivningskostnad, vilken i sin tur kommer att bero av det specifika projektets investeringskostnad, ränta och avskrivningstid, och jämföras med avskrivningskostnaden för alternativ.

Detta gäller även för ökade driftkostnader som uppkommer som ett resultat av pyrolysen. Exempel på ökade driftkostnader skulle kunna vara ökat personalbehov och kostnader för certifieringar som endast är relevanta för pyrolys.

Till sist måste man även ta hänsyn till eventuella uteblivna intäkter på grund av pyrolys. Väljer en VA-organisation exempelvis att ersätta tidigare biogasproduktion med pyrolys måste utebliven intäkt från biogas räknas bort. Biogasproduktion och pyrolys kan dock kombineras.

9.3.2 Mervärde pyrolys

Marknadssituationen för avloppsslam i Sverige i dag skiljer sig åt över landet, men generellt belastas VA-organisationen med en kvittblivningskostnad för att en upphandlad entreprenör ska hämta genererat avloppsslam. Kvittblivningskostnaden skiljer sig dock åt mellan olika regioner. Enbart det faktum att man genom pyrolys genererar ca 90 % färre ton slambiokol jämfört med avloppsslam innebär en betydande minskning av kvittblivningskostnaden. Den för VA-organisationen positiva effekten av att kvittblivningskostnaden minskar innebär samtidigt en negativ effekt för den entreprenör som upphandlats att ta emot slammet. Detta skulle kunna påverka entreprenörernas intresse att eller krav för att ta emot slambiokol.

Pyrolys av avloppsslam har potential att generera fyra separata intäktsströmmar: slambiokol, värme, mottagning av externt avloppsslam samt BCR-krediter. Värdet på slambiokolet beror av hur produktionen, potentiella användningsområden och marknader utvecklas i takt med ökad kunskap, vilket beskrivits i kapitel 5. Beroende på mängden överskottsvärme som produceras kan olika val för användning motiveras. Vid mindre produktion kan överskottet användas internt på avloppsreningsverket för att ersätta

inköpt värme, medan man vid större värmeproduktion skulle kunna motivera anslutning till när- eller fjärrvärmenät för att möjliggöra försäljning. Det finns även pyrolystekniker som inte genererar överskottsvärme. Skulle en VA-organisation ha en pyrolysanläggning som kräver insamling av avloppsslam för att täcka dess kapacitet finns även möjlighet till intäkt genom mottagningsavgifter från andra VA-organisationer. Slutligen kvarstår potentiell intäkt från BCR-krediter. Huruvida VA-organisationer bör sälja eller behålla dessa internt återkommer vi till i avsnitt 9.4.5.

9.4 Nuvärdesanalys

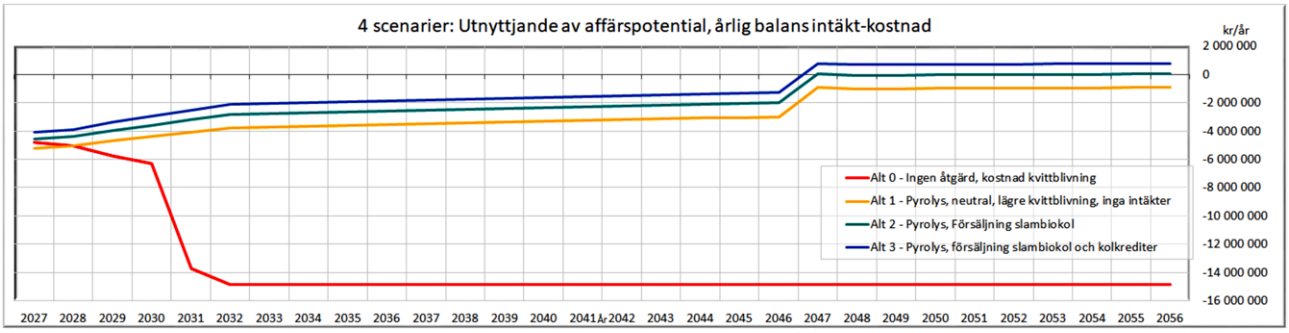
En bedömning av huruvida pyrolys av avloppsslam är ekonomiskt motiverat beror på det specifika projektets förutsättningar varför det är svårt att visa siffror som är representativa för samtliga svenska VA-organisationer. Dock, för att visa hur de olika posterna i beräkningsmodellen kan förhålla sig till varandra och hur mycket de påverkar den totala bedömningen, följer nedan en nuvärdesanalys för fyra scenarier där vi utgått från olika uppsättningar av data. Nuvärdesanalysen är utförd av Roslagsvatten och baserad på Roslagsvattens specifika förutsättningar med avseende på kvittblivningskostnad, investeringskostnad, ränta, och så vidare.

9.4.1 Affärsscenarier

De fyra affärsscenarier som analyseras och illustreras i Figur 9.1 är:

- *Alternativ 0 – Ingen åtgärd:* Avloppsslammet hanteras enbart genom kvittblivning utan ytterligare behandling likt dagens situation. Roslagsvatten förutspår, efter diskussioner med interna inköpare, att kostnaden för kvittblivning om 1 000 kr/ton kommer att fördubblas efter 2030.
- *Alternativ 1 – Pyrolys utan försäljning:* En pyrolysanläggning installeras vilket minskar kvittblivningskostnaderna och genererar värmeöverskott som ersätter inköpt energi för drift av värmepump (Coefficient of Performance (COP) = 3) till ett värde av 1,5 kr/kWh. Kvittblivningskostnad på slambiokolet om 500 kr/ton. BCR-krediter nyttjas internt inom verksamheten.
- *Alternativ 2 – Pyrolys med slambiokolförsäljning:* Samma förutsättningar som i alternativ 1 kvarstår med undantag för att slambiokolet kan säljas till en intäkt om 800 kr/ton och därmed inte medför kvittblivningskostnad. BCR-krediter nyttjas internt inom verksamheten.
- *Alternativ 3 – Pyrolys med försäljning av slambiokol och BCR-krediter:* Samma förutsättningar som i alternativ 2 kvarstår med undantag för att BCR-krediter säljs vidare och därmed genererar intäkt om 1 000 kr/ton slambiokol.

Figur 9.1
Nuvärdesanalys för fyra scenarier.



9.4.2 Resultat av nuvärdesanalys

Nuvärdesanalysen visar en tydlig trend där kostnaderna i alternativ 0 utgörs av kvittblivningskostnaden för avloppsslammet. Bedömningen att kvittblivningskostnaden kommer att fördubblas till år 2030 kan ifrågasättas, samtidigt som det finns regioner som redan i dag har kvittblivningskostnader som överstiger Roslagsvattens. Samtidigt fortsätter kostnaderna att öka med ökad kvittblivning och slamvolym fram till Roslagsvattens anläggnings maximala kapacitet på 1 770 ton torrsubstans år 2032, där de stabiliseras. I pyrolysalternativen minskar dock kostnaderna för slamhantering markant, särskilt i alternativ 3 där försäljning av BCR-krediter adderar till de ekonomiska fördelarna. Nettonuvärde för de olika alternativen listas i Tabell 9.1.

1. *Initiala och återkommande kostnader:* Pyrolysalternativen kräver initiala investeringar som avskrivs över 20 år. Efter 20 år, dvs. år 2046, uppstår kostnader för renovering och uppgradering, vilket förklarar avskrivningshacket i kurvorna för alternativ 1, 2 och 3 i Figur 9.1. Byggnaden som anläggningen finns i avskrivs däremot över 65 år, vilket ger en långsiktig ekonomisk stabilitet.
2. *Ekonomiska fördelar med slambiokolförsäljning och BCR-krediter:* I alternativ 2 och alternativ 3 genereras intäkter som drastiskt minskar den totala kostnaden. BCR-krediter i alternativ 3 medför en positiv ekonomisk effekt genom att möjliggöra för VA-organisationen att realisera värdet av kolinlagring, i linje med hållbarhetsmålen för klimatåtgärder.

Tabell 9.1
Nettonuvärden över 30 år och 2,25 % internränta.

Scenario	Tidsperiod	Nettonuvärde
Alternativ 0 – Ingen åtgärd, kostnad kvittblivning	30 år	-285 mkr
Alternativ 1 – Pyrolys, neutral, lägre kvittblivning, inga intäkter	30 år	-66 mkr
Alternativ 2 – Pyrolys, försäljning av slambiokol	30 år	-46 mkr
Alternativ 3 – Pyrolys, försäljning av slambiokol och kolkrediter	30 år	-31 mkr

Notera att Roslagsvattens ekonomiska förutsättningar inte nödvändigtvis är representativa för alla svenska VA-organisationer. Den slutsats man dock kan dra är att den minskade kvittblivningskostnaden för avloppsslammet är den avsevärt viktigaste komponenten för att sänka Roslagsvattens kostnader för avloppsslamhantering.

9.4.3 Känslighetsanalys av marknadsscenarier

För att ta hänsyn till framtida prisutveckling för kvittblivning, slambiokol och BCR-krediter har flera realistiska scenarier simulerats för utvecklingen baserade på olika trender och ekonomiska förutsättningar. De olika scenarierna bedöms också för varje marknad som ekonomiskt mest eller minst fördelaktiga för en investering i pyrolysteknik. Notera att en hög kvittblivningskostnad kan vara ofördelaktigt för branschen generellt, samtidigt som det stärker motivet för en investering i pyrolysteknik, och således är fördelaktigt ur det perspektivet. Baserat på nuvarande trender och prognoser inom miljöpolitik, klimatmarknader och avfallshantering bedöms också ett av scenarierna som det mest sannolika för varje prisutveckling. Resultaten från känslighetsanalysen redovisas i Tabell 9.2 och Figur 9.2.

Prisutveckling för kvittblivning:

- *Scenario 1 – Stabil ökning:* Kvittblivningskostnaderna ökar med inflationen och en viss årlig justering för ökade regleringskostnader (till exempel 3–5 % per år). Detta scenario är realistiskt med tanke på ökande miljökrav och kostnader för deponi och transport.
- *Scenario 2 – Accelererad ökning:* En snabbare prisökning, drivet av skärpta miljökrav och regleringar på avfallshantering. Här kan kvittblivningskostnaderna stiga med 5–10 % årligen. Detta alternativ bedöms som mest sannolikt, och det är också det alternativ som gör pyrolysalternativet mest ekonomiskt attraktivt.

- *Scenario 3 – Stabilisering eller minskning:* Kostnaderna ökar initialt men stabiliseras eller till och med minskar över tid på grund av framtida teknisk utveckling, nya marknadskrafter eller politiska beslut. Även om detta scenario är positivt för VA-branschen, är det minst fördelaktigt för en investering i pyrolysteknik.

Betalningsvilja för slambiokol:

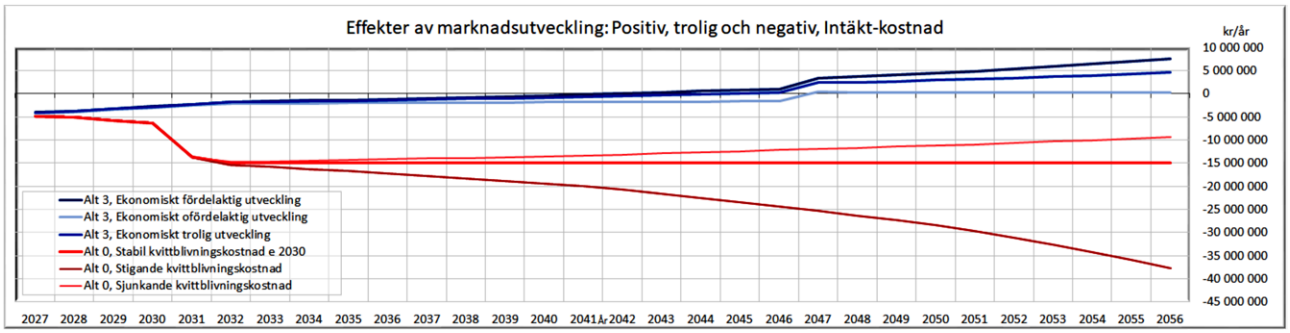
- *Scenario 1 – Ökande efterfrågan på slambiokol:* Med ökad förståelse för slambiokolets potential som jordförbättring kan priserna stiga med 3–7 % per år. Roslagsvatten bedömer detta alternativ som mest sannolikt samtidigt som det gör pyrolys mest ekonomiskt attraktivt.
- *Scenario 2 – Stabilt pris:* Priset på slambiokol hålls relativt stabilt eftersom marknaden etableras och en balans mellan utbud och efterfrågan uppnås.
- *Scenario 3 – Prisfall genom marknadsmättnad:* Om marknaden mättas snabbt kan priset sjunka eller stagnera på grund av överskott. Detta scenario är mindre sannolikt, men möjligt om fler aktörer snabbt ökar produktionen. Det är också det minst fördelaktiga för investering i pyrolysteknik.

Pris på BCR-krediter:

- *Scenario 1 – Stabil ökning:* Med ökande klimatmedvetenhet och tryck från EU:s klimatpolitik kan priserna på BCR-krediter öka med 5–10 % per år, särskilt om EU-system för certifiering av koldioxidupptag införs och skapar en standard. Detta alternativ gör pyrolys mest ekonomiskt attraktivt och bedöms samtidigt som det mest sannolika.
- *Scenario 2 – Volatil marknad:* Priserna varierar kraftigt beroende på politiska beslut, ekonomiska kriser och klimatpolitiska förändringar. Prisvariationer kan röra sig mellan +10 % och -5 % årligen, vilket ger stor osäkerhet men också potentiella intäktsökningar.
- *Scenario 3 – Stagnation på grund av överutbud:* Om många nya projekt tillkommer snabbt utan tillräcklig efterfrågan kan priset på kolkrediter falla, särskilt i frivilliga marknader där krediternas trovärdighet är avgörande. Detta scenario är det minst fördelaktiga för en investering i pyrolys.

Tabell 9.2
Nettonuvärden för känslighetsanalys över 30 år och med 2,25 % internränta.

Scenario	Tidsperiod	Nettonuvärde prisstegring 2030	Nettonuvärde 2024 nivå kvittblivning
Alternativ 3, Ekonomiskt fördelaktig utveckling	30 år	+7 mkr	+7 mkr
Alternativ 3, Ekonomiskt trolig utveckling	30 år	-8 mkr	-8 mkr
Alternativ 3, Ekonomiskt ofördelaktig utveckling	30 år	-36 mkr	-36 mkr
Alternativ 0, Stigande kvittblivningskostnad	30 år	-421 mkr	-267 mkr
Alternativ 0, Stabil kvittblivningskostnad 2030	30 år	-285 mkr	-153 mkr
Alternativ 0, Sjunkande kvittblivningskostnad	30 år	-249 mkr	- 124 mkr



Figur 9.2
Känslighetsanalys av marknadsscenarier.

9.4.4 Slutsats av nuvärdesanalys

Nuvärdesanalysen visar att den ekonomiskt primära nyttan med att pyrolysera avloppsslam för Roslagsvatten ligger i minskning av kvittblivningskostnaden. Det innebär att pyrolys kan vara ekonomiskt motiverat även om inga intäkter genereras för slambiokol och BCR-krediter. Samtidigt visar analysen att genererade intäkter från slambiokol och BCR-krediter ytterligare kan minska kostnaderna i Roslagsvattens fall. En betydelsefull faktor i analysen av kvittblivningskostnad är Roslagsvattens prognos på fördubbling av kvittblivningskostnaden fram till 2030. I känslighetsanalysen har därför nettonuvärdet också beräknats för 2024 års kvittblivningskostnad som utgångsläge utan denna initiala prisstegring. Kostnaden för kvittblivningen blir då mindre dramatisk men resultatet kvarstår att minskad kvittblivning utgör den primära ekonomiska nyttan.

Det är visserligen tänkbart med en marknadsutveckling för slambiokol och BCR-krediter så att affären på mycket lång sikt kan övergå till en nettointäkt, och även ett positivt nuvärde under de förutsättningar som undersökts här. Ju fler och mer diversifierade produkter som kan utvinnas och säljas, såsom slambiokol och BCR-krediter, desto mindre kvarvarande kostnader bärs av VA-kollektivet. Analysen understryker att en helhetslösning med slambiokolförsäljning och BCR-krediter, som i alternativ 3, erbjuder de mest fördelaktiga ekonomiska och miljömässiga resultaten, även om marknadsundersökningen i rapporten (avsnitt 5.3) visat att betalningsvilja för slambiokolet inte är aktuell i dagsläget.

Känslighetsanalysen exponerar dessutom en betydande risk för VA-branschen i en situation där kvittblivningskostnaden fortsätter att öka, vilket gör att valet av pyrolysteknik potentiellt skyddar mot sådana framtida kostnadsökningar. Lägger vi till en framtida situation där krav på klimatneutralitet tillkommer skulle VA-organisationer med nuvarande slamhantering tvingas köpa in kolkrediter, vilket ytterligare försämrar ekonomin.

Slutsatsen är därmed att pyrolys av avloppsslam kan vara ekonomiskt motiverat med utgångspunkt i minskade kvittblivningskostnader, men att en bedömning måste göras för varje specifik VA-organisation.

9.4.5 Bör VA-organisationen sälja eller behålla BCR-krediter?

Marknaden för BCR-krediter är global, omogen och kraftigt beroende av ett fåtal stora köpare (se kapitel 6) varför prisläget därmed kan förändras snabbt. Ska då VA-organisationer sälja vidare BCR-krediter i stället för att behålla dem inom organisationen?

Om vi först ser på frågan utifrån ett klimatperspektiv så finns argument för att VA-organisationen ska behålla BCR-krediterna inom organisationen för att maximera det interna klimatarbetet, vilket går i linje med initiativet Klimatneutral VA-bransch 2030. Detta förutsätter naturligtvis att klimatberäkningsverktyget kan hantera och beräkna klimateffekter av pyrolys och slambiokol.

Utgår vi från ett ekonomiskt perspektiv kan vi dock argumentera för att VA-organisationen kommer i konflikt med vattentjänstlagens uppdrag om att VA-taxan

endast ska täcka nödvändiga kostnader. Att VA-organisationen inte säljer BCR-krediterna innebär en utebliven intäkt, vilken kan ses som en kostnad, vilket skulle motivera att BCR-krediterna ska säljas. Skulle det dock komma legala krav på VA-organisationers klimatneutralitet i framtiden måste alternativet att behålla BCR-krediter jämföras med att köpa in klimatkompensation. Om BCR-krediten kan säljas dyrare än alternativa kolsänkor kan köpas in kan försäljning av BCR-krediter motiveras med tanke på vattentjänstlagen.

Om vi ser över hur bedömningen av additionalitet kan påverka VA-organisationens beslut att behålla eller sälja BCR-krediten ska projektet inte vara lönsamt utan intäkter för kolkrediter för att slampyrolys ska vara additionellt (se kapitel 7). Som vi ser i avsnitt 9.4 visar Roslagsvattens nuvärdesanalys och känslighetsanalys att investeringen i slampyrolys, med ett undantag, inte kommer att vara lönsam. Däremot förbättras nuvärdet i samtliga scenarier av intäkter från BCR-krediten och därmed kan man argumentera för att försäljning av BCR-krediter är nödvändigt för att uppfylla additionalitet. Om certifieringsstandarden bedömer att projektet inte är additionellt uppstår inga BCR-krediter varken att sälja eller tillgodoräkna internt. Det återstår att se vilken bedömning som berörd certifieringsstandard gör för den första slampyrolysanläggningen i Sverige hos Roslagsvatten.

Roslagsvatten bedömer att försäljning av BCR-krediter är möjligt och förenligt med de krav om ansvarsfullt nyttjande av VA-taxan som ställs på VA-organisationer genom att det finns ett grundläggande ansvar att minska sina kostnader för hantering av avloppsslam, vilket pyrolys innebär i deras fall. Roslagsvatten menar dessutom att det är i VA-kollektivets bästa intresse att eftersöka intäktsströmmar där så är möjligt. Risken att bidra till en snedvriden konkurrenssituation på marknaden genom att subventionera BCR-krediter med ett lägre pris menar Roslagsvatten kan undvikas genom att eftersträva ett så högt pris som möjligt. Med tanke på att det i dagsläget inte finns några BCR-krediter från slambiokol tillgängliga på marknaden är det svårt att uttala sig om vilken prisnivå detta skulle innebära.

10 Värdekedja kring pyrolys av slam

Värdekedjan för en verksamhet syftar till att identifiera de aktiviteter och processer som krävs för att skapa en produkt eller utföra en tjänst. Genom att utvärdera vilket värde som varje steg i värdekedjan tillför och hur värdet kan maximeras kan verksamhetens motståndskraft mot konkurrerande verksamheter stärkas. I denna rapport utgår vi från Michael Porters modell för värdekedjor (Stobierski 2020).

Primära aktiviteter är de aktiviteter som är direkt bidragande till skapandet av produkten eller tjänsten (Stobierski 2020), vilka för pyrolys av avloppsslam listas nedan. Stödjande aktiviteter är de aktiviteter som bidrar till att effektivisera de primära aktiviteterna. Stödjande aktiviteter vid pyrolys av avloppsslam listas nedan. Värdekedjan kommer se olika ut för olika VA-organisationer och specifika avloppsreningsverk. Så gott det går försöker vi dock göra en generell bedömning och belysa alternativ och utgår från den övergripande beskrivningen av processen för att pyrolysera slam i kapitel 3. Värdekedja för pyrolys av avloppsslam illustreras i Figur 10.1.

Figur 10.1
Värdekedja för pyrolys av avloppsslam.

Som nämnts tidigare kan värdekedjan se olika ut för olika VA-organisationer. Värdekedjan i Figur 10.1 utgör en utgångspunkt i arbetet med affärsmodell. När värdekedjan för en specifik VA-organisation är etablerad bör den analyseras kontinuerligt med syfte att identifiera vilka aktiviteter, primära eller stödjande, som kan förbättras genom exempelvis kostnadsreduktion och produktutveckling (Stobierski 2020).

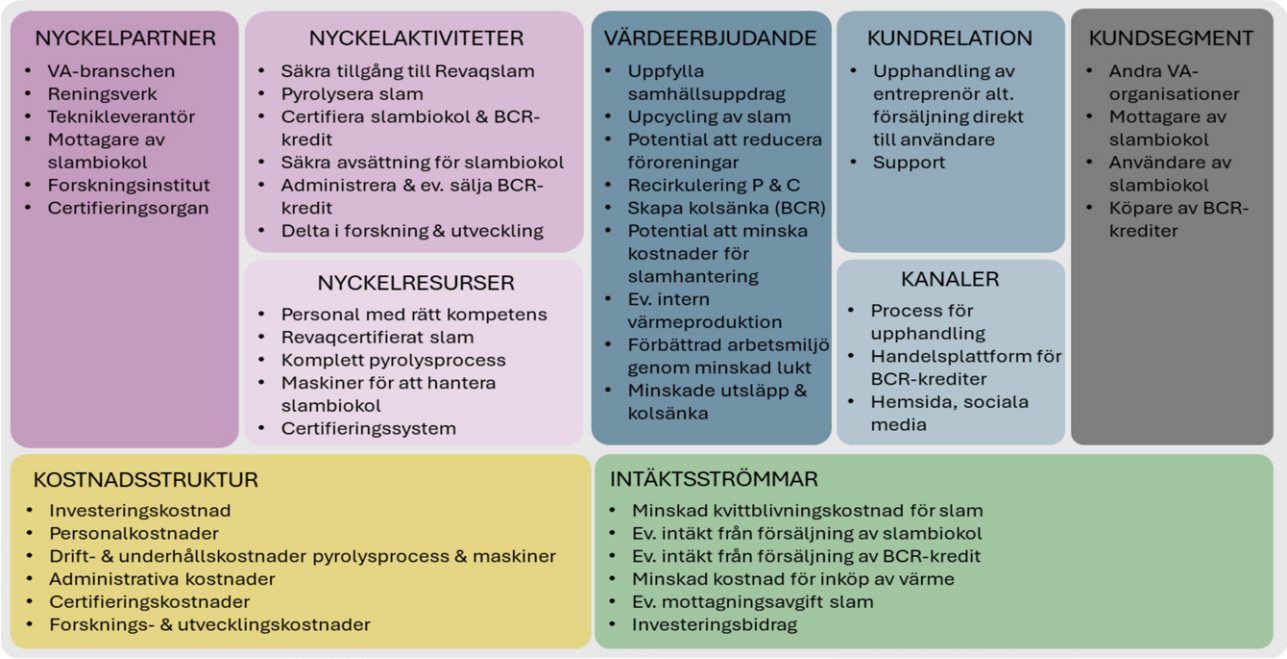
11 Affärsmodell för VA-organisationer kring slambiokol

En affärsmodell kan enkelt beskrivas som hur en verksamhet fungerar och hur den tjänar pengar (Ovans 2015). I denna rapport använder vi oss av modellen Business Model Canvas (Strategyzer 2024) för att på ett strukturerat sätt beskriva en affärsmodell för pyrolys av avloppsslam. Utöver att en affärsmodell är ett bra beslutsunderlag för etablering av en ny verksamhet eller utveckling av en befintlig verksamhet, är en väl utförd affärsmodell ett viktigt verktyg för att kommunicera och skapa samsyn inom organisationen.

11.1 Generell Business Model Canvas

Figur 11.1 illustrerar en generell affärsmodell för pyrolys av avloppsslam där olika alternativ belyses. Förtydliganden av varje kategori följer efter figuren.

Figur 11.1
Modellen Business Model Canvas (Strategyzer 2024) applicerad på VA-organisationer för att utforma och strukturera en affärsplan kring slampyrolys.



11.1.1 Nyckelpartner

VA-branschen: I och med att pyrolys av avloppsslam är en ny företeelse i Sverige finns ett stort värde i att samarbete inom VA-branschen. Det ligger i den offentliga sektorns natur att möjliggöra utbyte av information och erfarenheter som kan gynna branschen. Vi har i rapporten nämnt frågor som kan vara för stora för en enskild VA-organisation att hantera, men som VA-branschen genom samarbete kan ta sig an på ett bättre sätt.
Reningsverk: Beroende på storlek på pyrolysanläggningen kan avloppsslam från flera avloppsreningsverk behövas för att fylla processens kapacitet. Detta är inte något specifikt för pyrolys utan förekommer även vid andra behandlingsmetoder och biogasproduktion. Avloppsslammet bör vara Revaqcertifierat med tanke på att Revaq värderas högt av de intresseorganisationer som ställer krav på de lantbrukare som sprider slam.

Mottagare av slambiokol: För avsättning för slambiokolet är upphandling av entreprenör på samma sätt som görs för avloppsslam i dag ett alternativ. Slambiokolet kan också komma att säljas till mottagare, beroende på hur marknaden utvecklas. Mottagaren kan agera distributör på samma sätt som för slammet i dag, alternativt vidareförädla slambiokolet till en ny produkt till exempel genom metoder som kan bidra till ökad växttillgänglighet av näringsämnen som nämns i avsnitt 3.1.6.
Forskningsinstitut: Med tanke på behovet av mer kunskap och erfarenhet kring både produktion och användning av slambiokol är samarbete med forskningsinstitut avgörande för att säkra långsiktig avsättning för slambiokol.
Certifieringsorgan: Kvalitetssäkring av såväl slambiokol som BCR-kredit säkerställs enklast genom certifiering. Slambiokolet bör certifieras enligt Revaq och eventuellt genom EBC och BCR-krediten enligt någon av de tillgängliga certifieringsstandarderna. Eftersom kontakten med certifieringsorganen är återkommande underlättar en god relation kommunikationen mellan parterna.

11.1.2 Nyckelaktiviteter

Säkra tillgång till Revaqcertifierat avloppsslam: Återigen beroende på pyrolysprocessens kapacitet kan VA-organisationen behöva samarbeta med andra för att säkra tillgång på avloppsslam. Detta skulle kunna generera en separat intäktsström genom mottagningsavgift. Att avloppsslammet bör vara Revaqcertifierat bygger på inriktningen att säkra avsättning inom lantbruk. För avloppsslam som inte klarar kraven för Revaq kan det finnas möjlig avsättning som bränsle, vilket sker i andra europeiska länder.
Pyrolysera slam: Beroende på val av pyrolysteknik och utformning av process genomgår slammet olika steg för att transformeras till slambiokol, BCR-kredit och eventuellt överskottsvärme. Dessa steg kan involvera torkning, pelletering och pyrolys.
Certifiera slambiokol och BCR-krediter: Då slambiokol och BCR-krediter certifieras enligt olika standarder kan processen vara krävande med avseende på både personalresurser och tid. Med god kunskap om standardernas kravställning redan tidigt kan processen underlättas.
Säkra avsättning för slambiokol: Hur och till vem slambiokolet ska överlämnas är en central uppgift att lösa. Upphandling av entreprenör som tar emot slambiokolet på samma sätt som dagens avloppsslam är ett alternativ. Här måste man dock ta hänsyn till den nuvarande situationen med bristande kunskap och erfarenhet om slambiokol kan påverka utfallet i upphandlingen både med avseende på antal anbud och krav på ersättning. Alternativet är direkt försäljning av slambiokolet till olika köpare, vilket förutsätter användare som ser värdet av slambiokolet i den specifika applikationen. En köpare skulle kunna vara ett företag som förädlar slambiokolet, varför VA-organisationen inledningsvis kan gynnas av att säkerställa möjligheten för många aktörer att ta del av slambiokolet som ett sätt att öka erfarenheten och därmed bygga marknaden.
Administrera och eventuellt sälja BCR-krediter: För att säkerställa dokumentation och spårbarhet för BCR-krediter bör dessa administreras genom en så kallad MRV (Monitoring, Reporting and Verification) vilket minskar risk för dubbelräkning. BCR-krediterna säljs genom en av de tillgängliga handelsplattformarna. Ett alternativ är även att sälja utfärdade BCR-krediter direkt till kund alternativt behålla dem inom organisationen.
Delta i forskning och utveckling: Forskning och utökade försök är ett medel för att fylla de kunskapsluckor som finns kring slambiokol och en förutsättning för att skapa en långsiktig marknad. Genom att delta i forskningsprojekt kan VA-organisationen bidra med kunskap från användares erfarenheter och därmed öka både sin egen och andra aktörers kunskap.

11.1.3 Nyckelresurser

Personal med rätt kompetens: Då många av aspekterna kring att pyrolysera avloppsslam är nya för svenska VA-organisationer finns behov av både utbildning och eventuellt rekrytering. Erfarenheten från ett stort antal pyrolysprocesser är att pyrolystekniken är fortsatt innovativ och kräver både teknisk kunskap och ett stort engagemang från driftpersonalen. Dessutom innebär såväl certifieringsprocesserna som hanteringen av BCR-krediter omfattande administrativt arbete i en internationell miljö.
Revaqcertifierat avloppsslam: Som vi beskrivit i avsnitt 5.2 är Revaq en högt värderad kvalitetsstämpel för avloppsslam, och genom sin tidiga inkludering av slamkol, som innefattar slambiokol, finns goda möjligheter att den även kommer att vara en förutsättning för acceptans av slambiokol.
Komplett pyrolysprocess: Olika leverantörer av pyrolysteknik inkluderar olika delar i sina erbjudanden. VA-organisationen måste därmed säkerställa att samtliga delar som krävs finns tillgängliga och integrerade med varandra till en komplett process. Detta inkluderar även nödvändig infrastruktur på siten som till exempel anslutningar.
Maskiner för hantering av slambiokol: Beroende på hur slambiokolet förpackas kan maskiner för tunga lyft krävas för hantering av till exempel slambiokol i bulk, storsäckar eller containrar.
Certifieringsstandarder: Certifieringsorganen uppdaterar kontinuerligt sina standarder varför VA-organisationen bör följa utvecklingen för att säkerställa att verksamheten gör nödvändiga ändringar, alternativt kunna bedöma om en annan certifieringsstandard är bättre lämpad.

11.1.4 Värdeerbjudande

Uppfylla samhällsuppdrag: VA-organisationens huvudsakliga uppgift är att uppfylla sitt uppdrag som samhällsviktig verksamhet, vilket även görs med pyrolys. Med hänvisning till den nuvärdeskalkyl som visades ovan ser pyrolys även ut att bidra till ett effektivt och ansvarsfullt nyttjande av kommunala medel.
Upcycling av avloppsslam: Avloppsslam är ett avfall som genom pyrolys har potential att upcyclas till slambiokol, BCR-kredit och värme. Med upcycling avses återvinning och uppgradering till produkter eller material av ett högre värde.
Potential att reducera föroreningar: Med nuvarande kunskapsläge pekar forskningen enhetligt mot att pyrolys har potential att reducera vissa vanligt förekommande organiska föroreningar i slam även om fortsatt forskning behövs.
Recirkulering av P och nedlåsning av C: Två kriterier som lyfts i utredningen Hållbar slamhantering är just att fosfor och kol i slammet ska återföras. Ur ett samhällsperspektiv kan effektiv recirkulering av fosfor bidra till ökad nationell självförsörjning. Hur fosforns växttillgänglighet ser ut över tid är dock fortsatt en obesvarad fråga. Det stabila kolet nedlåses i jorden.
Skapa kolsänka: Pyrolysen skapar en stabil kolstruktur som utgör en certifierbar kolsänka, så kallad BCR-kredit.
Potential att minska kostnader för slamhantering: Enligt tidigare scenarier för om pyrolys kan motiveras ur ett ekonomiskt perspektiv finns potential för att minska VA-organisationens kostnader genom pyrolys.
Eventuell intern värmeproduktion: Beroende på pyrolysteknik kan VA-organisationen tillgodose internt värmebehov alternativt generera värme som kan säljas till andra aktörer, beroende på teknikens kapacitet och utformning.
Förbättrad arbetsmiljö genom minskad lukt: Genom att pyrolysera avloppsslam minskar lukten vid hantering både på reningsverket och för användaren av slambiokol jämfört med avloppsslam. Detta har en positiv påverkan på arbetsmiljön och kan dessutom möjliggöra spridning av slambiokol där slamspridning inte tidigare varit tillåtet på grund av lukt.
Minskade utsläpp och kolsänka: Pyrolys av avloppsslam är starkt motiverat ur ett klimatperspektiv jämfört med andra befintliga metoder för slamhantering.

11.1.5 Kundrelationer

Upphandling av entreprenör alternativt försäljning direkt till användare: Om en entreprenör upphandlas för att ta emot slambiokolet regleras denna relation i avtal. Vid direkt försäljning till ett fåtal användare kan även dessa relationer regleras i avtal.
Support: I och med att slambiokol är en ny företeelse är kunskapsspridning viktig för att skapa intresse för materialet. VA-organisationer som pyrolyserar slam kan få stötta användare och nya intressenter med information om slambiokolet.

11.1.6 Kanaler

Process för upphandling: Möjliga mottagare av slambiokolet nås genom upphandlingsprocessen, vilken till exempel kan kommuniceras genom upphandlingsplattform eller inbjudan.
Handelsplattform för BCR-krediter: Ska BCR-krediterna säljas kan detta göras genom att nyttja befintliga handelsplattformar. Dessa kan nyttjas antingen som ”skyltfönster” eller genom att handelsplattformen själva åtar sig att sälja krediterna.
Hemsida, sociala medier: Hur pyrolys och slambiokol bör kommuniceras inkluderas i VA-organisationens övergripande kommunikationsarbete. Med tanke på det omfattande värdeerbjudandet finns underlag för en separat kommunikationsplan som tar hänsyn till den höga innovationsgraden och därmed låga allmänna kunskapen.

11.1.7 Kundsegment

Huruvida en aktör kategoriseras som nyckelpartner eller kund är inte alltid självklart. En nyckelpartner är en viktig, värdeskapande och ofta långsiktig del i verksamheten medan en kundrelation kan vara en engångsföreteelse. I affärsmodellen för slampyrolys skulle till exempel mottagare av slambiokol och köpare av BCR-krediter kunna utgöra både partner och kunder, beroende på upplägg.
Andra avloppsreningsverk: Vid insamling av avloppsslam från andra avloppsreningsverk utgör även de en kund med potential att betala mottagningskostnad.
Mottagare av slambiokol: Beroende på upplägg kan mottagaren agera distributör av slambiokolet, alternativt vara samma part som använder det. Eftersom avsättningen för slambiokolet är en nyckelaktivitet och utgör en förutsättning för verksamheten och uppkomsten av BCR-krediter bör mycket fokus ligga på att skapa en gynnsam relation till den part som mottar slambiokolet. I och med att slambiokol är ett nytt material kommer kunskapsutbyte mellan producent och mottagare att vara en förutsättning för att säkra avsättning för slambiokolet hos användare.
Användare av slambiokol: Beroende på utvecklingen av olika applikationer för slambiokol kan användare till exempel vara lantbrukare, jordföretag och/eller skogsägare.
Företag som vill köpa BCR-krediter: Marknaden för BCR-krediter är global med större techbolag som största köpare. Kolsänkor som skapas lokalt kan dock ses som en fördel eller krav, varför det kan finnas intressenter i regionen.

11.1.8 Kostnadsstruktur

Investeringskostnad: Avskrivningskostnad för investeringen i pyrolys.
Personalkostnader: Kostnader för personal inklusive utbildning.
Drift- och underhållskostnader för pyrolysprocess och maskiner: Kostnader för drift och underhåll kan delvis inkluderas i avtal med teknikleverantör.
Administrativa kostnader: Kan inkludera kostnader vid eventuell försäljning av BCR-krediter såsom avgift för säljplattform.
Certifieringskostnader: Återkommande kostnad för att certifiera och upprätthålla certifiering av slambiokol och eventuellt BCR-krediter.
Forsknings- och utvecklingskostnader: Bidrag till forskningsprojekt genom tid eller delfinansiering och kostnader för utveckling av pyrolysprocess.

11.1.9 Intäktsströmmar

Minskad kvittblivningskostnad för avloppsslam: Enligt nuvärdesanalysen har potentialen att minska kvittblivningskostnaden en betydande effekt på den ekonomiska situationen för slamhantering.
Eventuell intäkt från försäljning av slambiokol: Beroende på marknadens utveckling kan slambiokolet generera intäkter och ha en betydande påverkan på nuvärdesanalysen.
Eventuell intäkt från försäljning av BCR-krediter: Intäkt från sålda BCR-krediter har betydande inverkan på nuvärdesanalysen. Om VA-organisationen väljer att behålla BCR-krediten inom organisationen uteblir denna intäkt.
Minskad kostnad för inköp av värme: Beroende på mängd producerad överskottsvärme skulle detta även kunna innebära en intäkt vid försäljning av värme.
Eventuell mottagningsavgift för avloppsslam: För större anläggningar med kapacitet att samla in slam från andra avloppsreningsverk.
Investeringsbidrag: Investeringsprogrammet Klimatklivet har delfinansierat merparten av alla projekt kring biokolproduktion i Sverige, varför det finns potential även för slambiokol.

Sammanfattningsvis innebär affärsmodellen att VA-organisationen pyrolyserar slam med utgångspunkt i att förbättra ekonomin för slamhantering, minska slammets belastning på miljön och minska VA-organisationernas klimatavtryck. Ekonomin förbättras genom att på kort sikt (beroende på storleken på den specifika VA-organisationens kvittblivningskostnad) minska kvittblivningskostnaden och på lång sikt genom att skapa betalningsvilja för slambiokol. Beroende på utformning av teknik kan genererad överskottsvärme bidra till att minska verksamhetens driftkostnad. VA-organisationen kan även göra valet att behålla eller sälja vidare genererade BCR-krediter.

Mottagare av slambiokolet kan vara en upphandlad distributör, ett företag som förädlar slambiokolet eller användare. Ökad kunskap och forskning kommer att bidra till att dessa aktörer utkristalliseras, och VA-organisationen bör vara en viktig drivkraft för att bidra till att dagens kunskapsluckor fylls.

Med tanke på den höga graden av innovation kommer nära relationer till såväl leverantör av pyrolysteknik, mottagare av slambiokol, forskningsinstitut och certifieringsorgan att vara avgörande för att utveckla verksamheten i en positiv, kvalitetssäkrad och långsiktig riktning.

Med tanke på att regelverk relaterade till såväl avloppsslam som biokol är under utveckling både på nationell och europeisk nivå måste VA-organisationen kontinuerligt se över behov av ändringar för att anpassa sig till nya legala och marknadsmässiga förutsättningar.

11.2 SWOT-analys av affärsmodell

En SWOT-analys (från eng. Strengths Weaknesses Opportunities and Threats) syftar till att utvärdera nuläget för en verksamhet, projekt eller process (Wall 2023). Nedan bedömer vi affärsmodellen för slampyrolys utifrån riktlinjer för SWOT-analys men använder svenska begrepp. Styrkor och svagheter är förhållanden som kan påverkas internt, medan möjligheter och hot har sin grund i omvärlden (Wall 2023).

STYRKOR

- **Ekonomiskt motiverat** jämfört med ”traditionell” slamhantering enligt samtliga scenarier i jämförande nuvärdesanalys
- Kombinationen av sänkta kostnader och flera intäktsflöden ger **ekonomisk resiliens**
- **Mindre mängd avfall** att hantera, vilket ger minskad kvittblivningskostnad och minskat behov av transporter
- Möjliggör **avskiljning eller nedbrytning av organiska föroreningar** (PFAS, mikroplaster, läkemedel osv) vilket ökar chansen att klara förutspådda strängare krav
- Möjliggör **recirkulering av en andel av kol och näringsämnen** i avloppsslammet
- **Kan förädlas** genom t.ex. näringskomplettering, behandling för att frigöra fosfor
- **Minskar utsläpp** från lagring av slam och **genererar säljbar kolsänka**
- **Minskad dålig lukt** på VA-verket, vilket ger förbättrad arbetsmiljö, minskad lukt i närområdet och kan underlätta användning med avseende på var det kan spridas och i vilka jordprodukter det kan användas

SVAGHETER

- Etablerad **användning eller marknad för slambiokol saknas**, vilket försvårar avsättningen
- De initiala **investeringskostnaderna är höga,** vilket medför ekonomiska risker
- **Pyrolystekniken är fortfarande relativt obeprövad** varför utmaningar kan uppstå kring bl.a. drift, underhåll och ekonomi
- Merparten av **kvävet i avloppsslam recirkuleras inte**, vilket kan medföra behov av förädling och minska efterfrågan på slambiokol
- Det finns **osäkerheter kring växttillgänglighet för näringsämnen** över tid vilket försvårar uppskattningen av vilket värde slambiokolet tillför som gödselmedel
- Merparten av **tungmetaller i avloppsslammet koncentreras i slambiokolet** och hur dessa beter sig över tid är fortsatt oklart
- Kunskapen om slambiokol är låg varför **behovet av kommunikation är omfattande**

MÖJLIGHETER

- Negativa ekonomiska effekter av ev. framtida ökande kvittblivningskostnad kan undvikas
- Ekonomiskt effektiva klimatinvesteringar kan beviljas investeringsfinansiering och projektmedel
- BCR-kredit kan behållas vid ev. framtida krav på klimatneutralitet och ge **ökad ekonomisk kontroll**
- Generellt ökat fokus på klimat ökar **efterfrågan på kolkrediter**
- Genom att **nyttja befintligt regelverk** för avloppsslam möjliggör användning av slambiokol
- **Många påbörjade projekt och forskning** bidrar till att fylla kunskapsluckor och sprida information
- Nya europeiska och svenska regelverket för slam förutspås ställa **hårdare krav på hantering av föroreningar**, vilket gör **pyrolys till en av få tekniska lösningar**
- **Lantbrukares och intresseorganisationers stora intresse** ökar chanserna för avsättning av slambiokol
- **Ökad praktisk erfarenhet av slambiokol** från potentiella användare kan öppna upp för **nya affärsmöjligheter** genom förädling t.ex. genom näringssättning eller utvinning av fosfor
- **Minskad lukt och minskade föroreningar** kan **möjliggöra spridning på andra arealer** än slam

HOT

- Möjligheten till att sälja **BCR-krediter påverkas av valt certifieringsorgans bedömning av additionalitet och VA-branschens tolkning av Vattentjänstlagen**
- Vid **ev. begränsning av slamspridning** i nya regelverk riskerar detta att påverka avsättning för slambiokol
- **Pyrolystekniken är fortsatt obeprövad**, varför det finns en risk att tekniker inte lever upp till den kvalitet, kapacitet eller ekonomi som utlovats
- Projekt där **alternativa tekniker för slamhantering** testas är initierade och risken finns att dessa tekniker och genererade produkter **utvärderas som mer fördelaktiga**, vilket skulle kunna minska intresset för slambiokol
- **Begränsad erfarenhet** av storskalig användning av slambiokol skapar osäkerheter kring förutsättningarna för en framtida marknad
- **Delvis negativ inställning** till användning av avloppsslam kan påverka inställningen till slambiokol och därmed försvåra avsättning
- Ökad efterfrågan på avloppsslam kan **minska kvittblivningskostnaden vilket minskar de ekonomiska incitamenten** för att pyrolysera slam
- **Marknaden för BCR-krediter är omogen** med få stora köpare, vilket medför osäkert pris
- **Olika sammansättning och egenskaper** skapar risk att information om såväl positiva som negativa sidor av ett slambiokol felaktigt sprids generellt för alla slambiokol

12 Slutsatser

Denna rapport syftar till att beskriva en framtida marknad för slambiokol med utgångspunkt i kunskap om materialet slambiokol och en affärsmodell för pyrolys av avloppsslam. Nedan sammanställs slutsatserna från rapporten.

1. Slampyrolys möjliggör hantering av föroreningar och recirkulering av en andel fosfor och nedlåsning av en andel kol i avloppsslam.
Pyrolys av avloppsslam erbjuder möjligheter att hygienisera avloppsslam, hantera föroreningar samtidigt som en del av det kol och fosfor som finns i avloppsslammet kan återföras respektive recirkuleras. Forskning har visat att pyrolys är effektiv för att bryta ner föroreningar som PFAS, mikroplaster och läkemedelsrester. De flesta tungmetaller i avloppsslammet är dock kvar och koncentreras i slambiokolet. Tekniken medför att kolet i slammet fördelas mellan rökgaser och slambiokolet, där kolet i slambiokolet kan komma att utgöra en certifierbar kolsänka med lång stabilitet.

Det mesta av kvävet avgår medan det mesta av fosforn i avloppsslammet blir kvar efter pyrolys. Fosforn förekommer i olika kemiska former, där dess tillgänglighet för växter över tid påverkas av faktorer såsom slamkvaliteten, den specifika pyrolysprocessen och förhållandena i den jord där biokolet används. I dag krävs det tester för att fastställa växttillgängligheten av fosfor i varje enskilt slambiokol och dess specifika tillämpning.

2. Kunskapsluckor kvarstår om tungmetaller och näring över tid, och behovet av mer forskning kvarstår trots många försök på gång.
Hur koncentrationen av tungmetaller och växttillgänglighet av näringsämnen påverkar slambiokolets egenskaper över tid utgör nyckelfrågor att lösa för att säkerställa avsättning för materialet. Det saknas forskning över längre tidsperspektiv och med tanke på slambiokolets stabilitet är detta av största vikt för att säkerställa avsättning för materialet. Denna osäkerhet förstärks av att potentiella användare ofta lyfter fram behovet av säljarens garantier och ansvar som en grundförutsättning för framtida betalningsvilja.

Det finns ett intresse för pyrolys av slam inom VA-branschen, vilket bland annat speglas i de projekt som har initierats för att undersöka potentialen i en svensk kontext. Potentiella användare lyfter behovet av att förstå hur slambiokolet ska hanteras praktiskt och hur det kan integreras i deras befintliga verksamhet, förståelse som endast kan genereras genom gårds- och fältförsök med slambiokol.

Forskning på biokol (ej slambiokol) finns i större mängd i kombination med en etablerad marknad inom framför allt urban miljö i Sverige, vilken genererar kunskap och erfarenhet. Det ligger i VA-branschens intresse att generera kunskap om slambiokol specifikt för att undvika den generalisering av kunskap om biokol som felaktigt antagits gälla även för slambiokol.

3. Befintligt regelverk för avloppsslam kan anammas inledningsvis, men VA-branschen bör utvärdera klassning som avfall eller produkt.
Med undantag för Revaq saknas regelverk och frivilliga krav på slambiokol av naturliga skäl, men budskapet från myndigheter är att befintligt regelverk för avloppsslam kan anammas. Detta möjliggör avsättning för slambiokol ur ett legalt perspektiv samtidigt som dagens gränsvärden för tungmetaller i avloppsslam för spridning på jordbruksmark teoretiskt sett kan bli en utmaning för åtminstone vissa slambiokol. Potentiella användare och intresseorganisationer inom lantbrukssektorn lyfter Revaq som en viktig kvalitetsstämpel som kan bidra till att underlätta acceptans för slambiokol. Med tanke på att nya nationella och europeiska regelverk för avloppsslam kan komma, finns dessutom osäkerheter kring hur detta kan påverka förutsättningarna för slambiokol.

Vilket regelverk som berör slambiokol är starkt kopplat till huruvida slambiokol klassas som ett avfall eller en produkt. VA-branschen bör göra en detaljerad utvärdering av vilken klassning som är mest fördelaktig och hur det konkret skulle påverka såväl VA-organisationer, mottagare av slambiokol som användare med avseende på juridik och ekonomi. Tillsammans kan VA-kollektivet motivera utvecklingen av specifika regelverk för slambiokol i det fall som det bedöms gynnsamt.

4. Intresset för slambiokol är stort hos potentiella användare inom lantbruk, men betalningsvilja för slambiokol är kopplad till garanti och ansvar från säljaren.

Den övergripande inställningen och nyfikenheten till slambiokol från såväl potentiella användare, intresseorganisationer inom lantbrukssektorn och potentiella producenter är positiv. Det finns ett intresse att veta mer och att fylla de kunskapsluckor som finns om slambiokolets egenskaper och hur slambiokolet kan integreras i potentiella användares befintliga verksamheter. Forskningens nuvarande kunskapsläge ses inte som tillfredsställande, men tillräckligt enhetligt för att skapa hoppfullhet kring potentialen.

Då den naturliga jämförelsen görs mot avloppsslam, finns en skepsis kring betalningsvilja för slambiokol såvida inte det ekonomiska värdet kan bevisas och att ansvaret för slambiokolet trycks över på säljaren. Betalningsviljan måste baseras på det ekonomiska värde som slambiokolet tillför användaren, vilket i sin tur förutsätter kunskap om hur slambiokolet fungerar särskilt när det används som gödselmedel inom jordbruket.

Såväl användare som intresseorganisationer är öppna för en fortsatt dialog, vilket bör förvaltas av VA-branschen för att möjliggöra framtida avsättning för slambiokol oavsett betalningsvilja eller ej.

5. Användning som gödselmedel inom jordbruk är närmaste avsättningen i tid genom substitution av avloppsslam.

I arbetet med rapporten har potentialen för slambiokol på olika marknader beskrivits baserat på möjliga användares bedömningar och attityder. Med hänsyn till tidsaspekten från nuläge till avsättning för slambiokol dras slutsatsen att användning som gödselmedel inom jordbruk är närmast förestående. Befintligt regelverk för slamspridning kan anammas och inställningen från lantbrukssektorn är positiv. Dessutom kan VA-organisationernas befintliga logistik, administration och nätverk för avloppsslam nyttjas även för slambiokol med undantag för skillnader relaterat till praktisk hantering av materialet. Den främsta utmaningen har identifierats vara gränsvärden för tungmetaller som i dag är satta för avloppsslam då det finns en risk att åtminstone vissa slambiokol överskrider dessa vilket då behöver hanteras. Inställningen till användning i urban miljö är mer tveksam, men öppenheten för att veta mer finns även här. Övriga användningsområden som lyfts bedöms kräva betydande utveckling eller ha längre tid till marknadsmässig användning.

6. Marknad och nätverk måste byggas omkring varje enskild VA-organisation med pyrolys.

Det finns ingen etablerad användning och därmed marknad för slambiokol i Europa i dag, vilket gör att en nyckelaktivitet i affärsmodellen är att säkra avsättning för slambiokolet. En jämförelse med uppbyggnaden av branschen för växtbaserat biokol visar att produktion och användning utvecklats parallellt, vilket också bör vara fallet för slambiokol. Varje VA-organisation som överväger pyrolys bör därmed räkna med ett arbete att bygga nätverk och kommunikationsinsatser som möjliggör avsättning, med fördel inom det geografiska närområdet.

7. Pyrolys som behandlingsmetod för avloppsslam är motiverat ur ett klimatperspektiv.

Pyrolys av avloppsslam innebär positiva effekter ur ett klimatperspektiv både genom minskade utsläpp av växthusgaser och genom att generera kolsänka som kvantifieras ur ett 1000-årsperspektiv. Jämförande LCA-analyser av olika slamhanteringsmetoder visar fördelar med pyrolys. Detta faktum kvarstår även om BCR-krediter säljs vidare och delar av utsläppsminskningarna uppstår hos andra aktörer än VA-organisationen, men hur stor andel som kan räknas till VA-organisationens klimatarbete beror av gränsdragning till andra aktörer.

Valet att behålla eller sälja BCR-krediter kan påverkas av certifieringsstandardernas bedömning av additionalitet, vattentjänstlagens krav på användning av VA-taxan och av eventuella krav på klimatneutralitet för VA-branschen.

8. Pyrolys av avloppsslam har ekonomisk potential främst genom minskad kvittblivningskostnad.

Bedömning av huruvida slampyrolys kan motiveras ur ett ekonomiskt perspektiv måste göras baserat på förutsättningarna för den specifika VA-organisationen, och några generella slutsatser kan därmed inte dras. Däremot visar nuvärdesanalys och känslighetsanalys för Roslagsvattens satsning på slampyrolys att de kan uppnå betydande kostnadsminskningar som främst beror av minskad kvittblivningskostnad. VA-organisationens kvittblivningskostnad, som skiljer sig åt över landet, är därmed starkt kopplad till den ekonomiska potentialen för pyrolys av avloppsslam. Intäkter från försäljning av BCR-krediter är realistiska på kort sikt och bidrar ytterligare till minskade kostnader för VA-verksamheten. Betalningsvilja för slambiokolet är inte trolig på kort sikt, men eventuella framtida betalningspotential förbättrar nuvärdesanalysen ytterligare. Genom att ha flera källor till såväl minskade kostnader som intäkter ges verksamheten ökad ekonomisk resiliens, och skulle kvittblivningskostnaden öka innebär pyrolys ett sätt att motverka denna effekt.

9. Genom samarbete kan VA-branschen överkomma utmaningar kring slampyrolys.

En styrka inom kommunal verksamhet är öppenheten kring att dela med sig av erfarenheter. Inledningsvis kommer föregångare inom slampyrolys stöta på en rad utmaningar. Genom delade erfarenheter kan vi undvika att flera organisationer stöter på samma problem. Kunskapsspridning mellan VA-organisationer bidrar även till att motivera teknikleverantörer att utveckla och förbättra sitt erbjudande. Branschen behöver ansöka om undantag och eventuellt ta fram en svensk bilaga, likt Danmark, för att bemöta det rådande EBC-förbudet mot att använda slambiokol i andra applikationer än inblandning i material.

Vilket som är det mest fördelaktiga sättet att klassa teknik för pyrolys av avloppsslam kvarstår att utvärdera, likväl som att klargöra betydelsen av vad ingående avloppsslam till pyrolys är klassat som, då det beroende på olika omständigheter skulle kunna bedömas vara både ett avfall och inte ett avfall. Erfarenhet från biokolsanläggningar är att de första projekten används i bedömningen av efterföljande projekt, varför en gemensam syn inom VA-branschen är fördelaktig. Vi nämnde även tidigare behovet av att bedöma huruvida slambiokol gynnas av klassning som avfall eller produkt, vilket skulle utgöra en branschgemensam uppgift.

Med tanke på den låga kännedomen om slambiokol hos såväl möjliga producenter, användare som tillståndsmyndigheter finns ett stort behov av kommunikationsinsatser. Samtidigt har intresset varit stort för slambiokol från merparten av de parter som kontaktats och därmed informerats om slambiokol inom arbetet med denna rapport. Denna börda ligger på den enskilda VA-organisationen för att säkra ett lokalt nätverk, men på en högre nivå finns ett stort värde i branschgemensamma, riktade kommunikationsinsatser.

10. Affärsmodell bör utvecklas stegvis i takt med ökad kunskap om slambiokol och utvecklat regelverk.

I och med det tidiga skedet för slampyrolys och slambiokol är det realistiskt att affärsmodellen måste utvecklas löpande. Det är dock tydligt att behovet av att uppnå och dokumentera kvalitet är viktigt, varför producenter av slambiokol bör följa Revaq. Krav på EBC-certifiering för biokol uppkommer främst vid användning i urban miljö, varför det inte nödvändigtvis är relevant för spridning av slambiokol på jordbruksmark. Befintliga certifieringsstandarder för BCR-krediter är en förutsättning för att sälja BCR-krediter, men skulle VA-organisationen välja att behålla BCR-krediterna internt kan kostnader för certifiering undvikas så länge som spårbarhet, beräkning och dokumentation säkerställs.

Inledningsvis bör slambiokolet hanteras utan att förvänta sig intäkt, med syfte att bidra till forskning och försök, för att om möjligt skapa förutsättningar för framtida betalningsvilja. Beroend e på vald pyrolysanläggning kan överskottsvärme nyttjas internt, och vid behov av större mängder avloppsslam kan ytterligare intäktsström skapas genom slammottagningsavgift.

Affärsmodeller i alla branscher måste anpassas kontinuerligt, men i synnerhet när det handlar om skapandet av en helt ny företeelse och marknad. Kunskapsläget kring slambiokol förbättras genom pågående forskning och försök. Regeländringar för avloppsslam förväntas komma och VA-branschen kan själva driva på etablering av regelverk för slambiokol samtidigt som regelverket för handel med kolkrediter utvecklas i snabb takt. Allt ger underlag för att ha flexibilitet i åtanke vid upprättandet av affärsmodellen för pyrolys av avloppsslam hos svenska VA-organisationer.

Referenser

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*.

Alfa Chemical (2022). Adsorptionsprincipen för aktivt kol. https://se.alfa-chemical.com/info/the-adsorption-principle-of-activated-carbon-68809503.html [2024-09-20]

Bahr B. v. (2016). *Miljösystemanalys av Ekobalans process för pyrolys av slam*: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Barbhuiya S., Bhusan Das B. och Kanavaris F. (2024). Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability: *Case Studies in Construction Materials*.

Baresel C., Karlsson L., Malovanyy A., Thorsén G., Goicoechea Feldtmann M., Holmquist H., Dalahmeh S., Ahrens L. och Winkens Pütz K. (2022). *PFAS – hur kan svenska avloppsreningsverk möta utmaningen?* SVU-rapport 2022-7. Stockholm: Svenskt Vatten.

Bartoli M., Arrigo R., Malucelli G., Tagliaferro A. och Duraccio D. (2022). Recent Advances in Biochar Polymer Composites: *Polymers*.

Bataillou G., Lee C., Monnier V., Gerges T., Sabac A., Vollaire C. och Haddour N. (2022). Cedar Wood-Based Biochar: Properties, Characterization, and Applications as Anodes in Microbial Fuel Cell: *Applied Biochemistry and Biotechnology*.

Bilas F., Kalderis D., Richardson C., Barbayiannis N. och Gasparatos D. (2023). Biochar application as a soil potassium management strategy: A review: *Science of The Total Environment*.

Biokolprodukter (2022). Klimatpositiv Anläggning. https://biokolprodukter.se/klimatpositiv-anlaggning/ [2024-09-11]

Blecken G. och Viklander M. (2022). *Rening av dagvatten i biofilter: Effekt av biokol som tillsats i filtermaterialet*. Luleå tekniska universitet.

Bornø M. L., Zervas A., Bak F., Merl T., Koren K., Nicolaisen M. H., Jensen L. S. och Müller-Stöver D.S. (2023). Differential impacts of sewage sludge and biochar on phosphorus-related processes: An imaging study of the rhizosphere: *Science of the Total Environment*.

Broekhoff D., Gillenwater M., Colberg-Sangree T. och Cage P. (2019). *Securing Climate Benefit: A guide to Using Carbon Offsets*. Stockholm: Stockholm Environmental Institute.

Budai A., Zimmerman A. R., Cowie A. L, Webber J. B.W., Singh B.P., Glaser B., Masiello C.A., Andersson D., Shields F., Lehmann J., Camps Arbestain M., Williams M., Sohi S. och Joseph S. (2013). *Biochar Carbon Stability Test Method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability*: International Biochar Initiative.

Buss W., Kamonchanard A., Shepherd J. G., Heal K. V. och Sohi S. (2018). Biochar Phosphorus Release Is Limited by High pH and Excess Calcium: *J Environ Qual*.

Buss W., Wurzer C., Bach M., Heberling J., Appel T., Gerber H. och Masek O. (2022). Highly efficient phosphorus recovery from sludge and manure biochars using potassium acetate pre-treatment: *Journal of Environmental Management*.

Börjesson G. (2021). *Slamspridning på åkermark – mullhaltens betydelse*. SVU-rapport 2021-9. Stockholm: Svenskt Vatten.

Callegari A. och Capodaglio A. (2018). Properties and Beneficial Uses of (Bio)Chars, with Special Attention to Products from Sewage Sludge Pyrolysis: *Resources*.

Cao J., Jiang Y., Tan X., Li L., Cao S., Dou J., Chen R., Hu X., Qiu Z., Li M., Chen Z. och Zhu H. (2024). Sludge-based biochar preparation: pyrolysis and co-pyrolysis methods, improvements, and environmental applications: *Fuel*.

Carbon Credits Inc (2024). The Ultimate Guide to Understanding Carbon Credits. https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-understanding-carbon-credits/ [2024-11-09].

Carbonfuture (2023). Carbonfuture and Puro.earth Partner to Accelerate Scaling of Durable Carbon Removal. https://www.carbonfuture.earth/magazine/carbon-future-and-puro-earth-partner-to-accelerate-scaling-of-durable-carbon-removal [2024-11-09].

Carbonfuture (2024). Biochar Carbon Removal. https://www.carbonfuture.earth/cdr-insight-technologies/biochar-carbon-removal [2024-12-04]

Carbonfuture (2025). Biochar Carbon Removal. https://www.carbonfuture.earth/cdr-insight-technologies/biochar-carbon-removal [2025-02-07]

CDB Executive board (2012). *Tool for the demonstration and assessment of additionality version 07.0.0*: UNFCCC.

CDM Executive Board (2015). *GUIDELINES ON COMMON PRACTICE version 3.1*: UNFCCC.

CDR.fyi (2024). We bring transparency and accountability to the carbon removal market. https://www.cdr.fyi/ [2024-12-05]

Certification of Environmental Standards (2024). EBC. https://www.ceres-cert.de/en/services/service-623~ebc.html [2024-09-11]

Chen X., Jeyaseelan S. och Graham N. (2022). Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge: *Waste Management*.

Chiari D., Bier H., Wieth C., Gerber H., Nilsen P., Kasian N., Helaine D., Lebonnois D., Andersson D., Gunnerud L. och Meitner D. (2024). *Sewage Sludge as feedstock for pyrolysis to be included in the scope of the EU Fertilizing Products Regulation*: European Biochar Industry Consortium.

Clough T.J., Condron L.M., Kammann C. och Müller C. (2013). A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics: *Agronomy*.

Coalster (2023). *Substance Identification Profile – Charcoal (Biochar)*. Tyskland: Coalster.

de Figueiredo C. C., Pinheiro T.D., de Oliveira L.E.Z., de Araujo A.S., Coser T.R. och Paz-Ferreiro J. (2020). Direct and residual effect of biochar derived from biosolids on soil phosphorus pools: A four-year field assessment: *Science of The Total Environment*.

Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., Zeng G., Zhou L. och Zheng B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review: *Agron. Sustain. Dev.*

Dong J., Chi Y., Tang Y., Ni M., Nzihou A., Weiss-Hortala E. och Huang Q. (2015). Partitioning of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Pyrolysis, Gasification, and Incineration: *Energy & Fuels*.

EBC (2021). *Certification of the carbon sink potential of biochar*. Switzerland: Ithaka Institute.

EBC (2022). *European Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar*. Switzerland: Carbon Standards International (CSI).

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

ECHA (2012). *Guidance for Annex V Exemptions from the obligation to register*. Helsingfors: European Chemical Agency.

Embrén B. och Alvem B-M. (2017). *Växtbäddar i Stockholms stad – en handbok*. Stockholm: Stockholms stad.

Etter H., Vera A., Aggarwal C., Delaney M. och Manley S. (2023). *VM0044 Methodology for biochar utilization in soil and non-soil applications*: Verified Carbon Standard.

Europaparlamentet (1986). *Rådets direktiv 86/278/EEG om skyddet för miljön, särskilt marken, när avloppsslam används i jordbruket*. Bryssel: Europeiska unionen.

Europaparlamentet (2006). *Europaparlamentets och rådets direktiv 2006/12/EG om avfall*. Bryssel: Europeiska unionen.

Europaparlamentet (2008). *Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/98/EG om avfall och om upphävande av vissa direktiv*. Bryssel: Europeiska unionen.

Europaparlamentet (2019). *Förordning (EU) 2019/1009 om fastställande av regler för tillhandahållande av EU-gödselprodukter på marknaden och om ändring av förordningarna (EG) nr 1069/2009 och (EG) nr 1107/2009 samt om upphävande av förordning (EG) nr 2003/2003*. Bryssel: Europeiska unionen.

European Biochar Industry Consortium (2020). BioChar goes REACH. https://www.biochar-industry.com/2020/biochar-goes-reach/ [2024-08-30]

European Commission (2024). Carbon Removals and Carbon Farming. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en [2024-08-29]

Finansdepartementet KO (2004). *Produktsäkerhetslag (2004:451)*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Fløistad E. (2020). High content of herbicide residues in organic fertilizers. https://www.nibio.no/en/news/high-content-of-herbicide-residues-in-organic-fertilizers [2024-09-25]

Forbes (2022). The Concept Of Additionality In The Voluntary Carbon Market, Explained. https://www.forbes.com/councils/forbesnonprofitcouncil/2021/10/01/the-concept-of-additionality-in-the-voluntary-carbon-market-explained/ [2024-09-12]

Gaskin J.W., Steiner C., Harris K., Das K.C. och Bibens B. (2008). Effect of Low-Temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agricultural Use: *Transactions of the ASABE*.

Gellings C.W. och Parmenter K.E. (2004). *Energy efficiency in fertilizer production and use*. I: C.W. Gellings och K. Blok, red. *Efficient use and conservation of energy*. Oxford: Eolss Publishers.

Glaser B. och Lehr V-I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis: *Scientific Reports*.

Grau-Andrés R., Pingree R.A.M., Öquist G. M., Wardle A.D., Nilsson M-C. och Gundale J.M. (2021). Biochar increases tree biomass in a managed boreal forest, but does not alter N2O, CH4 and CO2 emissions: *GCB-BIOENERGY*.

Grundestam C., Johansson K., Mellin A., Malmaeus M. och Rahmberg M. (2020). *Konsekvensbeskrivning för framtida slamhantering och fosforåtervinning*: IVL.

Han W., Han D. och Chen H. (2023). Pyrolysis of waste tires: *MDPI*.

Hosseinian A., Brancoli P., Vali N., Ylä-Mella J., Pettersson A. och Pongrácz E. (2024). Life cycle assessment of sewage sludge treatment: Comparison of pyrolysis with traditional methods in two Swedish municipalities: *Journal of Cleaner Production*.

ICROA (2024). About. https://icroa.org/about/ [2024-09-09]

Jacobi D.F., Koch D., Löber J. och Schumann C. (2022). *P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten*: Hessisches Landelabor Standort Kassel.

Johannesdottir S., Nordin A., Persson E., Kusoffsky E. och Johansen A. (2023). *Slamhygienisering – kartläggning och utvärdering av tekniker*. SVU-rapport 2023-12. Stockholm: Svenskt Vatten.

Jordbruksverket (2004). *SJVFS 2004:62*. Jönköping: Statens jordbruksverk.

Jordbruksverket (2021). Användning av avloppsslam på jordbruksmark. https://jordbruksverket.se/download/18.666a627517078da0aba4a5a4/1646227175268/Informationsblad-slam-tga.pdf [2024-10-29]

Jordbruksverket (2024). Information om organiska gödningsmedel och jordförbättringsmedel från animaliska biprodukter. https://jordbruksverket.se/download/18.6b89a7ac1779a1011167e09b/1712144592049/Regler-for-organiska-godningsmedel-och-jordforbattringsmedel-tga.pdf [2024-10-15]

Joseph S., Cowie A. L., Van Z.L., Bolan N., Budai A., Buss W., Luz C.M., Graber E.R., Ippolito J.A., Kuzyakov Y., Luo Y., Sik O.Y., Palansooriya K.N., Shepherd J., Stephens S., Weng Z. H. och Lehmann J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar: *GCB Bioenergy by John Wiley & Sons Ltd*.

Justitiedepartementet (1992). *Produktansvarslagen (1992:18)*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Jämtgård S., Öquist M., Högberg P., Högbom P., Strengbom J., Henriksson N., Clemmensen E. och Laudon H. (2023). *Förstudie kring miljöanpassad skogsgödsling för ökad skoglig tillväxt – slutrapportering av regeringsuppdrag*. Rapport Skog 2023:2. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.

Jönsson H., Junestedt C., Willén A., Yang J., Tjus K., Baresel C., Rodhe L., Trela J., Pell M. och Andersson S. (2015). *Minska utsläpp av växthusgaser från rening av avlopp och hantering av avloppsslam*. SVU-rapport 2015-02. Stockholm: Svenskt Vatten.

Kemikalieinspektionen (2023). Vårt uppdrag. https://www.kemi.se/om-kemikalieinspektionen/vart-uppdrag [2024-08-30]

Kemikalieinspektionen (2024a). Produkt eller avfall – håll koll på skillnaden så att du kan följa reglerna. https://www.kemi.se/stod-till-foretag/din-roll-och-ditt-ansvar/atervinnare-eller-anvandare-av-atervunna-material/produkt-eller-avfall---hall-koll-pa-skillnaden-sa-att-du-kan-folja-reglerna [2024-08-30]

Kemikalieinspektionen (2024b). EU-gödselprodukter. https://www.kemi.se/lagar-och-regler/lagstiftningar-inom-kemikalieomradet/eu-gemensam-lagstiftning/eu-godselprodukter [2024-09-03]

Kemikalieinspektionen (2024c). Kort om Reach-förordningen. https://www.kemi.se/lagar-och-regler/lagstiftningar-inom-kemikalieomradet/eu-gemensam-lagstiftning/reach-forordningen/kort-om-reach-forordningen [2024-09-09]

Klimat- och näringslivsdepartementet (2013:251). *Miljöprövningsförordningen (2013:251)*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Klimat- och näringslivsdepartementet (2013:253). *Förordning (2013:253) om förbränning av avfall*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Klimat- och näringslivsdepartementet (2018:471). *Förordning (2018:471) om medelstora förbränningsanläggningar*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Klimat- och näringslivsdepartementet (2020:614). *Avfallsförordning (2020:614)*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Klimat- och näringslivsdepartementet (2024). *Ändrade krav på rapportering och registerhållning av uppgifter om användning av avloppsslam i jordbruket*: Klimat- och näringslivsdepartementet.

Kopp C. Sica P., Lu C., Tobler D., Stoumann Jensen L. och Müller-Stöver D. (2023). Increasing phosphorus plant availability from P-rich ashes and biochars by acidification with sulfuric acid: *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

Kopp C., Sica P., Grubbe Eising A., Egeberg Madsen D., Magid J. och Müller-Stöver D.S. (2024). Enhancing Phosphorus Fertilizer Value of Sewage Sludge Ashes and Biochars Through Chemical Pre-treatments and Application Methods: *Waste Biomass Valor*.

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*.

Lahti R., Bergna D., Romar H., Tuuttila T., Hu T. och Lassi U. (2017). Physico-Chemical Properties and Use of Waste Biomass-Derived Activated Carbons: *Chemical Engineering Transactions*.

Larsson Jönsson H., Fransson A-M., Lundahl L., Tufvesson H., Thelin G., Bernhoff S-O. och Gustafsson D. (utan datum). Odlingsförsök med biokol. https://biokol.org/rapporter/pdf/odlingsfoersoek-med-biokol-i-agrara-system [2024-10-03]

Law Y., Jacobsen G.E., Smith A.M., Yuan A. och Lant P. (2013). Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants: *Water Research*.

Linderholm K. (2011). *Fosfor och dess växttillgänglighet i slam – en litteraturstudie*. SVU-rapport 2011-16. Stockholm. Svenskt Vatten.

Liu J., Lin L., Wang K., Ding R., Xie Z. och Zhang P. (2022). Concentrations and Species of Mercury in Municipal Sludge of Selected Chinese Cities and Potential Mercury Emissions From Sludge Treatment and Disposal: *Front. Environ. Sci.*

LRF (2024). LRF rekommenderar Revaq-certifierat slam. https://www.lrf.se/nyheter/lrf-rekommenderar-revaq-certifierat-slam/ [2024-10-07]

Länsstyrelsen Västerbotten (2022). *Tillstånd till pyrolys av slam på fastigheten Nyskogen 1:8 i Umeå kommun*. Beslut 551-814-2020: Länsstyrelsen Västerbotten.

Malovanyy A., Hedman F., Goioechea Feldtmann M., Harding M. och Yang J. (2021). *Rening av PFAS-förorenat vatten från avfallsanläggningar*: IVL.

Mašek O., Buss W., Brownsort P., Rovere M., Tagliaferro A., Zhao L., Cao X. och Xu G. (2019). Potassium doping increases biochar carbon sequestration potential by 45%, facilitating decoupling of carbon sequestration from soil improvement: *Scientific Reports*.

Miljöbalken (1998:808). *SFS Miljöbalken (1998:808)*. Stockholm: Sveriges riksdag.

MSB (2022). *Handbok i kommunal krisberedskap – 2. Kommunala verksamheter*: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

Möller V., van Diemen R., Matthews J.B.R., Méndez C., Semenov S., Fuglestvedt J.S. och Reisinger A. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Annex II: Glossary*. Cambridge: IPCC.

Naturvårdsverket (1994:2). *SNFS 1994:2 Kungörelse med föreskrifter om skydd för miljön, särskilt marken, när avloppsslam används i jordbruket*. Stockholm: Statens naturvårdsverks författningssamling

Naturvårdsverket (1998:899). *SFS (1998:899) Förordning om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Naturvårdsverket (1998:944). SNFS (1998:944) *Förordning om förbud m.m. i vissa fall i samband med hantering, införsel och utförsel av kemiska produkter*. Stockholm: Sveriges riksdag.

Naturvårdsverket (2021). *Avfall som resurs*. Stockholm: Naturvårdsverket.

Naturvårdsverket (2023a). Avloppsslam på jordbruksmark. https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/avfall/avloppsslam-pa-jordbruksmark/ [2024-12-05]

Naturvårdsverket (2023b). Statistik och uppföljning. https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/utslappshandel/statistik-och-uppfoljning/ [2024-10-01]

Naturvårdsverket (2024a). Avfall, utsläpp av växthusgaser. https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-avfall/ [2024-12-05]

Naturvårdsverket (2024b). Bedömning av när avfall upphör att vara avfall. https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/avfall/bedomning-av-nar-avfall-upphor-att-vara-avfall/ [2024-08-30]

Naturvårdsverket (2024c). Hur kan jag minska min klimatpåverkan?. https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-konsumtionen/hur-kan-jag-minska-min-klimatpaverkan/ [2024-12-04]

Naturvårdsverket (2024d). Utsläppshandel – så funkar det. https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/utslappshandel/utslappshandel-for-allmanheten/ [2024-09-10]

Naturvårdsverket (2024e). Vad är utsläppshandel?. https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/utslappshandel/utslappshandel-for-allmanheten/vad-ar-utslappshandel/ [2024-12-04]

Oumar K. (2024). *Stability of sewage sludge biochar in soil*. Uppsala: SLU.

Ovans A. (2015). What Is a Business Model?. https://hbr.org/2015/01/what-is-a-business-model [2024-10-01]

Paulsson M. (2020). *Sammanfattande slutrapport för projektet Rest till Bäst (steg 2)*: Rest till Bäst.

Prasad R. och Chakraborty D. (2019). *Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil*: Extension.

Puro.earth (2024a). About Puro.earth. https://puro.earth/about [2024-11-21]

Puro.earth (2024b). *Additionality Assessment Requirements Version 2.0*. Helsingfors: Puro Earth.

Puro.earth (2024c). Certify your carbon removal. https://puro.earth/ [2024-08-29]

Puro.earth (2024d). Puro Standard. https://puro.earth/puro-standard-carbon-removal-credits [2024-09-11]

Puro.earth (2024e). Puro Standard Biochar Methodology. https://puro.earth/ [2024-04-23]

Pyreg (2020). Sewage sludge. https://pyreg.com/wp-content/uploads/2020_pyreg_brochure_sludge_EN.pdf [2024-10-08]

Pyreg (2023). Pyrolysis not only eliminates PFAS from sewage sludge, the biochar also absorbs PFAS in contaminated soils. https://pyreg.com/pyrolysis-not-only-eliminates-pfas-from-sewage-sludge-but-also-absorbs-existent-pfas/ [2024-09-14]

Re:source (2023). Biokol för renare jordar. https://resource-sip.se/2023/08/18/biokol-for-renare-jordar/ [2024-10-10]

Regeringskansliet (2008). *Förordning (2008:245) om kemiska produkter och biotekniska organismer*. Stockholm: Regeringskansliet.

Regeringskansliet (2022). Nytt direktiv om produktansvar. https://www.regeringen.se/faktapromemoria/2022/11/202223fpm7/ [2024-10-07]

Revaq (2024). *Regler för certifieringssystemet utgåva 9.0*: Svenskt vatten.

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

RISE (2023). EU har publicerat utvärdering av slamdirektivet https://www.ri.se/sv/svenskanaringsplattformen/nyheter/slamdirektivet-utvarderat [2024-09-03]

Riverse (2024a). Biochar application to soils V2.0. https://docs.riverse.io/methodologies/biomass-carbon-removal-and-storage-bicrs/carbon-storage/biochar-application-to-soils#id-2rhx2av7of74 [2024-12-05]

Riverse (2024b). The Riverse Standard. https://www.riverse.io/standard-overview [2024-12-05]

Sachpazidou V., Fransson A-M., Augustsson A., Hellmann J. och Hematimatin N. (2023). *Fosfortillgänglighet i biokol och jord med biokol*: Rest till Bäst.

Salzman J. och Weisbach D. (2024). The additionality double standard. Cambridge, Massachusetts, US: Harvard Environmental Law.

Sanei H., Rudra A., Moltesen Przyswitt Z M.,Kousted S., Benkhettab Sindlev M., Zheng X., Bom Nielsen S. och Ingermann Petersen H. (2024). Assessing biochars' permanence: An inertinite benchmark: *International Journal of Coal Geology*.

Schlederer,F., Martín-Hernández E. och Vaneeckhaute C. (2024). Ensuring safety standards in sewage sludge-derived biochar: Impact of pyrolysis process temperature and carrier gas on micropollutant removal: *Journal of Environmental Management*.

Schmidt H-P., Kammann C. och Hagermann N. (2024). *Global Biochar C-Sink 3.0*. Switzerland: Ithaka Institute.

Senken (2024). Understanding Carbon Credits. https://www.senken.io/academy/understanding-carbon-credits [2024-09-23]

Shen J., Yuan L., Li H., Bai Z., Chen X., Zhang W. och Zhang F. (2011). Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant: *Plant Physiol*.

Sigill Kvalitetssystem AB (2024a). IP-certifieringar inom olika områden. https://www.sigill.se/omraden-och-regler/ [2024-08-29]

Sigill Kvalitetssystem AB (2024b). IP Kolkrediter Grundcertifiering Standard för certifierade kolkrediter. https://www.sigill.se/omraden-och-regler/kolkrediter [2024-08-29].

Singh S., Kumar V., Singh Dhanjal D., Datta S., Bhatia D., Dhiman J., Samuel J., Prasad R. och Singh J. (2020a). A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: Valorization, opportunities, challenges and future prospects: *Journal of Cleaner Production*.

Singh T. B., Ali A., Prasad M., Yadav A., Shrivastav P., Goyal D. och Dantu P.K. (2020b). *Role of Organic Fertilizers in Improving Soil Fertility*. I: M. Naeem, A. Ansari och S. Gill, red. *Contaminants in agriculture*. Cham: Springer, pp. 66–71.

SOU (2020:3). *Hållbar slamhantering*. Stockholm: Statens Offentliga Utredningar.

Statistikdatabasen (2020). Produktion och användning av slam från reningsverk efter region och användningskategori. Vartannat år 2014-2022. https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0106/MI0106T03/table/tableViewLayout1/ [2024-10-25]

Statistiska Centralbyrån (2023). Utsläpp av växthusgaser från avfall efter typ av växthusgas och delsektor. År 1990–2023. https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0107/MI0107AvfallN/ [2024-09-30]

Stobierski T. (2020). What Is a Value Chain Analysis? 3 Steps. https://online.hbs.edu/blog/post/what-is-value-chain-analysis [2024-10-01]

Stockholms stad (2024). Marksanering i Riddersvik. https://vaxer.stockholm/projekt/hasselby-villastad/bostader-i-riddersvik/marksanering-i-riddersvik/ [2024-09-05]

Strategyzer (2024). The Business Model Canvas. https://www.strategyzer.com/library/the-business-model-canvas [2024-10-01]

Svenska Institutet för Standarder (2024). CE-märkning. https://www.sis.se/standarder/ce-markning/ [2024-09-03]

Svenskt Vatten (2022). Internationellt arbete. https://www.svensktvatten.se/politik-paverkan/europeiskt-paverkansarbete/slamdirektivet/ [2024-09-03]

Svenskt Vatten (2024a). Investeringsbeslut och VA-taxa. https://www.svensktvatten.se/vara-sakomraden/organisation-och-styrning/investeringsbeslut-och-va-taxa/ [2024-12-03]

Svenskt Vatten (2024b). *Klimatberäkningsverktyg för VA-anläggningar – Användarmanual Version 3*. Stockholm: Svenskt Vatten.

Svenskt Vatten (2024c). Klimatneutral VA-bransch. https://www.svensktvatten.se/vara-sakomraden/klimat-och-hallbarhet/klimatneutral-va/ [2024-11-19]

Svenskt Vatten (2024d). Projektet Norrslam ska tillvarata avloppsslammets nyttor – fler aktörer välkomnas. https://www.svensktvatten.se/om-oss/nyheter-lista/projektet-norrslam-ska-tillvarata-avloppsslammets-nyttor--fler-aktorer-valkomnas/ [2024-09-09]

Svenskt Vatten (2024e). Slamanvändning och Revaq. https://www.svensktvatten.se/vattentjanster/avlopp-och-miljo/kretslopp-och-uppstromsarbete/revaq-certifiering [2024-08-29]

Sveriges riksdag (1979). *Skogsvårdslag (1979:429)*. Stockholm: Landsbygds- och infrastrukturdepartementet RSL.

Sveriges riksdag (2006). *Lag (2006:412) om allmänna vattentjänster*. Stockholm: Klimat- och näringsdepartementet.

Sweden Water Research (2024). Fosfortillgänglighet i slam och slambiokol. https://www.swedenwaterresearch.se/projekt/fosfortillganglighet-i-slam-och-slambiokol/ [2024-09-10]

Sørmo E., Castro G., Hubert M., Licul-Kucera V., Quintanilla M., Asimakopoulos A. G., Cornelissen G. och Arp H.P.H. (2023). The decomposition and emission factors of a wide range of PFAS in diverse, contaminated organic waste fractions undergoing dry pyrolysis: *Journal of Hazardous Materials*.

Sørmo E., Dublet-Adli G., Menlah G., Øyre Flatabø G., Zivanovic V., Carlsson P., Almå, Å. och Cornelissen G. (2024a). Heavy Metals in Pyrolysis of Contaminated Wastes: Phase Distribution and Leaching Behaviour: *Environments*.

Sørmo E., Benedikte Mader Lade C., Zhang J., Asimakopoulos A. G., Wold Åsli G., Hubert M., Goranov A.I., Arp H.P.H. och Cornelissen G. (2024b). Stabilization of PFAS-contaminated soil with sewage sludge- and wood-based biochar sorbents: *Science of The Total Environment*.

Tan Z., Yuan S., Hong M., Zhang L. och Huang Q. (2020). Mechanism of negative surface charge formation on biochar and its effect on the fixation of soil Cd: *Journal of Hazardous Materials*.

Tay J., Ghen X., Jeyaseelan S. och Graham N. (2001). A comparative study of anaerobically digested and undigested sewage sludges in preparation of activated carbons: *Chemosphere*.

Thoma E.D., Wright R.S., George I., Krause M., Presezzi D., Villa V., Preston W., Deshmukh P., Kauppi P. och Zemek P.G. (2022). Pyrolysis processing of PFAS-impacted biosolids, a pilot study: *J Air Waste Manag Assoc*.

Thomsen T.P. (2018). *Drying and pyrolysis of sludge – In a climate perspective*. Riso: DTU Chemical Engineering.

Tomczyk A., Sokołowska Z. och Boguta P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*.

Torres-Rojas D., Hestrin P., Solomon D., Gillespie A.W., Dynes J.J., Regier T.Z. och Lehmann J. (2020). Nitrogen speciation and transformations in fire-derived organic matter: *Geochimica et Cosmochimica Acta*.

Trexler M.C., Broekhoff D.J. och Kosloff L.H. (2006). A Statistically-driven Approach to Offset-based GHG Additionality Determinations: What Can We Learn?: *Sustainable Development Law & Policy*.

Tullverket (2024). Bindande klassificeringsbesked, BKB. https://www.tullverket.se/foretag/internationellhandel/klassificeravaror/bindandeklassificeringsbeskedbkb.4.7df61c5915510cfe9e710a97.html?toggleAccordionText=bkb [2024-08-30]

UKWIR (2023a). *Biosolids to land: carbon emissions and carbon capture*: UKWIR.

UKWIR (2023b). *Converting sewage sludge to biochar – a review of options & feasibility*: UKWIR.

Vali N., Åmand L-E., Combres A., Richards T. och Pettersson A. (2021). Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge to Investigate Char and Phosphorous Yield Together with Heavy□Metal Removal — Experimental and by Thermodynamic Calculations: *Energies*.

Verra 2024. Who we are. https://verra.org/about/overview/ [2024-08-29]

Wall E. (2023). SWOT-analys: Så gör du en bra analys för din verksamhet. https://blogg.pwc.se/foretagarbloggen/swot-analys [2024-11-28]

Wang H., Xu J., Liu X., Zhang D. Li L., Li W. och Sheng L. (2019). Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China: *Soil and Tillage Research*.

Wei B., Yu J., Cao Z., Meng M., Yang L. och Chen Q. (2020). The Availability and Accumulation of Heavy Metals in Greenhouse Soils Associated with Intensive Fertilizer Application: *Int J Environ Res Public Health*.

World Economic Forum (2023). Biochar is carbon removal's jack of all trades. Here's why. https://www.weforum.org/agenda/2023/11/biochar-carbon-removals-jack-of-all-trades-for-immediate-climate-action/ [2024-09-10]

WWF (2020). *What makes a high-quality carbon credit? Phase 1 of the "Carbon Credit Guidance for Buyers" project: Definition of criteria for assessing the quality of carbon credits*: WWF.

Xing J., Xu G. och Li G. (2020). Comparison of pyrolysis process, various fractions and potential soil applications between sewage sludge-based biochars and lignocellulose-based biochars: *Ecotoxicology and Environmental Safety*.

Yara (2024). Hållbar intensifiering. https://www.yara.se/vaxtnaring/hallbarhet/hallbar-intensifiering/ [2024-10-25]

Yasim-Anuar T.A.T., Yee-Foong L.N., Abdullahi Lawal A., Ahmad Farid M.A., Mohd Yusuf M.Z., Ali Hassan M. och Ariffin H. (2022). Emerging application of biochar as a renewable and superior filler in polymer composites: *RSC Advances*.

Zhang J., Lü F., Zhang H., Shao L., Chen D. och He P. (2015*). Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication*: *Scientific reports*.

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*.

Zhou D., Liu D., Gao F., Li M. och Luo X. (2017). Effects of Biochar-Derived Sewage Sludge on Heavy Metal Adsorption and Immobilization in Soils: *International Journal of Environmental Research and Public Health*.

Zielínska A., Oleszczuka P., Charmas B., Skubiszewska-Zieba J. och Pasieczna-Patkowska S. (2015). Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.

Personlig kommunikation

Azzi, Elias; science and LCA advisor vid Puro Earth. 2024. Intervju 19 september.

Bataillou, Grégory; postdoctoral researcher. 2024. E-post 9 december.

Bose, Cezary; handläggare Naturvårdsverket – specialist slamspridning och VA-verksamhet. 2024. Intervju 3 september.

Dahlberg, Caroline; key account manager vid Ragn-Sells. 2024. Intervju 20 oktober.

Diurlin, Erik; kemist tillsyn/produktregistret och kemikaliestatistik vid Kemikalieinspektionen. 2024. Intervju 19 augusti.

Eskilsson, Johannes; växtnäringshandläggare vid Miljöregelenheten Jordbruksverket. 2024. Intervju 11 september.

Fransson, Ann-Mari; docent vid Linnéuniversitetet. 2024. Intervju 14 oktober.

Gerber, Helmut; CTO/managing partner vid Pyreg. 2024. Intervju 25 november.

Gruvaeus, Ingemar; chefsagronom vid Yara. 2024. Intervju 09 09 september.

Gustavsson, David; forskningsledare vid VA SYD. 2024. Intervju 13 december.

Hafner, Dominic; CTO vid Biochar Carbon Standard International. 2024. Intervju 12 september.

Hansson, Maria; strategisk inköpare vid Höganäs Sweden. 2024. Intervju 14 oktober.

Hermansson, Cecilia; projektledare vid Hushållningssällskapet Sjuhärad. 2024. Intervju 14 augusti.

Heron, Jude; officer market development vid Gold Standard. 2024. Intervju 25 september.

Kätterer, Thomas; professor vid Institutionen för ekologi, SLU. 2024. Intervju 18 september.

Magnusson, Linda; sales team leader vid Jacobi Carbons. 2024. E-post 1 oktober.

Pschera, Patrizia; specialist environment and climate vid Carbon Standards International. 2024. Intervju 30 april.

Reichardt, Philipp; sales manager vid Pyreg. 2024. Intervju 18 augusti.

Schwantner, Marcus; Coalster. 2024. Intervju 23 oktober.

Tullverket; medarbetare hänvisad via växeln. 2024. Intervju 19 augusti.

Virdarson, Jenny; Kemikalieinspektionens upplysningstjänst. 2024. Intervju 6 september.

Weith, Christian; chief marketing officer vid Aquagreen. 2024. Intervju 18 december.

Worfering, Demian; customer support vid Carbon Standards International. 2024. Intervju 1 november.

Bilagor

Bilaga A Jämförelse mellan slambiokol och befintliga alternativ

I Bilaga A jämförs slambiokol med avloppsslam/rötrest, mineralgödsel, organisk gödsel, biokol och aktivt kol vilka har en mer eller mindre etablerad avsättning. Syftet med jämförelsen är att ge underlag till bedömningen av vilka befintliga marknader som i framtiden skulle kunna vara intressanta för slambiokol, bland annat genom substitution.

Avloppsslam/rötrest

Avloppsslam och rötrest innehåller näringsämnen som fosfor och kväve samt organiskt material, men även tungmetaller och organiska föroreningar, inte minst PFAS. De används främst inom jordbruket, till anläggningsjord och som tätskikt på deponier, men kan också gå till förbränning. Figur A.1 visar en jämförelse mellan slambiokol och orötat slam.

Figur A.1
Slambiokol till vänster och orötat slam till höger. Foto: EcoTopic AB.

Inom jordbruket erbjuds en lantbrukare ofta avloppsslam utan kostnad eller inklusive ekonomisk ersättning. Inom jordbruket har avloppsslammet en funktion som gödselmedel och kan på så vis minska lantbrukarens kostnader för inköp av detsamma (Gruvaeus 2024, pers.kom.). Men gällande dess värde som fosforgödningskälla är det svårt att göra en kvalitativ uppskattning eftersom fosfortillgängligheten i avloppsslammet för växter delvis är oklar (Linderholm 2011). Företaget Ragnsells menar dock att flera lantbrukare fortsätter att köpa in mineralgödsel ”som vanligt” parallellt med slamspridningsinsatser, mot bakgrund av att det är mycket svårt att avgöra hur mycket kväve och fosfor som frigörs från år till år (Dahlberg 2024, pers.kom.). Ragnsells menar att det även är det organiska materialet i avloppsslam som utgör incitament till slamspridning. Medan kolet i slambiokol förekommer i stabilare form, är kolmängden och andelen organiskt material högre i avloppsslam (läs mer i avsnitt 3.1.3), vilket kan kompenseras för genom att slambiokolet ligger kvar i jorden under betydligt längre tid förutsatt att spridning på åkermark är möjlig. Fosfatfosforn är den direkt växttillgängliga formen av fosfor, men endast en liten andel av fosforn förekommer i denna form. Vissa andra former kan göras växttillgängliga bland annat med hjälp av syror som utsöndras från mikroorganismer och växtrötter (Linderholm 2011). Växttillgängligheten av denna fosfor på sikt är svår att uppskatta genom analyser då jordmiljön är både komplex och varierad och således svår att replikera i en analys i labbmiljö. Läs mer om växttillgänglighet av fosfor inklusive referens till försök med avloppsslam och slambiokol i avsnitt 3.1.6.

En miljösystemanalys som jämför tre olika sätt att försörja en hektar åkermark på mineralgödsel, slam+mineralgödsel samt slambiokol+mineralgödsel, fastställer att varken avloppsslammet eller slambiokolet innehåller tillräckligt med kväve eller kalium för att på egen hand försörja en vanlig gröda, utan att en viss mängd mineralgödsel behöver tillföras i båda fallen (Bahr 2016). Bahr (2016) utgick även från ett antagande om att växttillgängligheten var likvärdig mellan de tre alternativen, vilket är osannolikt, inte minst gällande fosfor.

I Tabell A.1 jämförs slambiokolets för- och nackdelar med avloppsslam och rötrest, med avseende på egenskaper som hantering, klimatpåverkan och användning i jordbruk. Regelverk, mer detaljerade ekonomiska aspekter och relevanta aktörers inställning behandlas närmare i andra delar av rapporten.

Tabell A.1
För- och nackdelar med slambiokol jämfört med slam eller rötrest. (Ordningen av uppradade för- och nackdelar förekommer utan inbördes rankning eller korrelation sinsemellan.)

Fördelar med slambiokol jämfört med slam/rötrest	Nackdelar med slambiokol jämfört med slam/rötrest
Minskad volym och vikt som underlättar hantering och transport med minskade kostnader och minskad klimatpåverkan (Bahr 2016; Pyreg 2020)	Förlust av kväve och minskad andel organiskt material under pyrolysprocessen (Tomczyk et al. 2020; Vali et al. 2021)
Högre koncentration av särskilt fosfor (Vali et al. 2021). Rapport om direkt växttillgänglig andel fosfor (Zhang et al. 2024)	Rapporterat minskad växttillgänglighet av fosfor jämfört med slam/med ökande pyrolystemperatur (Xing et al. 2020; Zhang et al. 2015; Glaser & Lehr 2019; Bornø et al. 2023)
Eliminering av patogener och nedbrytning/avskiljning av stor andel organiska föroreningar (Joseph et al. 2021; Chiari et al. 2024)	Koncentration av tungmetaller i slambiokolet (Xing et al. 2020)
Indikationer på tungmetallimmobilisering i slammet vid pyrolys i högre temperatur (Xing et al. 2020)	Begränsad erfarenhet och kunskap om långsiktiga effekter vid användning i jordbruk
Lägre växthusgasutsläpp i samband med hantering och långsiktig kolinlagring i mark (kolsänka), vilket bidrar till minskad klimatpåverkan (EBC 2023; Bahr 2016)	Pyrolys av orötat slam innebär utebliven biogasproduktion
Minskad lukt vid spridning på åkermark (utgör en begränsande faktor för slamspridning)	Högre (initiala) produktionskostnader jämfört med traditionell slamhantering vilket förutsätter hög resursåtervinning för ekonomisk lönsamhet (Hosseinian et al. 2024)

Sammanfattningsvis erbjuder slambiokol flera fördelar jämfört med obehandlat avloppsslam eller rötrest, särskilt gällande hantering av organiska föroreningar, recirkulering av en del näringsämnen och potential för långsiktig kolinlagring. Dock minskar andelen kväve och det finns behov av mer forskning om växttillgänglighet av näringsämnen över olika tidshorisonter och andra långsiktiga effekter vid jordapplikation. Det är oklart vilken effekt koncentrering av tungmetaller i slambiokolet kan ha på spridningspotentialen inom jordbruk. Det kan tilläggas att växttillgängligheten för näringsämnen också diskuteras för avloppsslam.

Mineralgödsel

Mineralgödsel (kallas också konstgödsel eller NPK-gödsel) är ett vanligt sätt att tillföra näringsämnen till åkermark. Det framställs genom extraktion av fosfor- och kaliummineral ur marken samt kvävebindning från luften, oftast med hjälp av naturgas (Bahr 2016) även om branschen gör åtgärder för att minska klimatpåverkan (Yara 2024). Mineralgödsel har hög växttillgänglighet för näringsämnen och är enkelt att hantera och sprida. Vidare finns det mineralgödsel som erbjuder både snabb- och långtidsverkande effekt, vilket möjliggör en hög grad av precisionsodling. Figur A.2 visar en jämförelse mellan slambiokol och pelleterad mineralgödsel.

Figur A.2
Slambiokol och pelleterad mineralgödsel. Foto: EcoTopic AB.

Produktion av mineralgödsel är energiintensiv och bidrar till betydande växthusgasutsläpp (Hosseinian et al. 2024; Bahr 2016). Hosseinian et al. (2024) påpekar i en LCA-studie att användning av slambiokol i stället för mineralgödsel kan ha betydande miljöfördelar. Det är dock viktigt att notera att studien inte gjorde något antagande om exempelvis fosforns växttillgänglighet i slambiokolet jämfört med mineralgödsel. I stället exkluderade forskarna jämförelsen av näringsämnenas tillgänglighet för växter från studien på grund av begränsad datatillgång. (Läs mer om fosforns växttillgänglighet i avsnitt 3.1.6.) Samtidigt framhåller Bahr (2016) att även om slambiokol kan ersätta en del av mineralgödseln är det fortfarande nödvändigt att komplettera med kväve och kalium för att säkerställa ett fullgott näringsinnehåll i jordbruket. Bahr (2016) redogjorde inte för potentiella skillnader i växttillgänglighet av näring. Kvävet vill man ofta som jordbrukare tillsätta i nära anslutning till att växtbehovet uppstår för att undvika näringsämnesförluster.

Mineralgödsel kan innehålla tungmetaller (Wei et al. 2020), precis som både avloppsslam och slambiokol. För att minska kadmiumhalten i åkermark på lång sikt behöver förhållandet mellan kadmium och fosfor (Cd/P-kvoten) i gödselmedel sänkas i förhållande till de nuvarande riktlinjerna för mineralgödsel (kvot 12) och avloppsslam (kvot 17) (Bahr 2016). Bahr (2016) rapporterar mätningar av en Cd/P-kvot på 2 i tyskt slambiokol behandlat vid 750 °C, vilket skulle kunna minska kadmiumhalten i åkermark med 8 % över en period på 100 år. För mineralgödsel förväntas kadmiumhalten förbli oförändrad, medan användning av avloppsslam skulle kunna öka kadmiumhalten med 5 % (Bahr 2016). Stora skillnader kan komma att förekomma mellan olika slags slambiokol.

Slambiokol anges kunna bidra till viss strukturförbättring i jorden, öka den vattenhållande förmågan och den mikrobiella mångfalden, samt minska bevattningsbehovet (Hosseinian et al. 2024; Ahmad et al. 2022). I jämförelse ökar mineralgödsel inte direkt jordens bördighet då det ej tillför organiskt material, vilket stimulerar mikroliv, utan kan till och med minska den. Även jordens pH-värde kan minska vid ensidig användning (Wang et al. 2019). Notera dock att effekterna på bördighet och markstruktur som slambiokol kan bidra med är begränsat av gränsvärden som finns för spridning av fosfor och tungmetaller som slambiokolet också innehåller (läs mer i avsnitten 3.1.7 och 4.4.3). Jämfört med växtbaserade biokol innehåller slambiokol betydligt mindre andel kol (läs mer under rubriken Biokol, nedan). Beroende på slambiokolets möjligheter att spridas och inkorporeras i jord likt NPK-gödsel, kan viss produktifiering behövas.

I Tabell A.2 jämförs slambiokolets för- och nackdelar med mineralgödsel, med avseende på egenskaper som hantering, klimatpåverkan och användning i jordbruk. Regelverk, mer detaljerade ekonomiska aspekter och relevanta aktörers inställning behandlas närmare i andra delar av rapporten.

Fördelar med slambiokol jämfört med NPK-gödsel	Nackdelar med slambiokol jämfört med NPK-gödsel
Lägre klimatpåverkan enligt miljösystemanalys (Bahr 2016) (utan att fastställa växttillgänglighet av näringsämnen i slambiokol)	Slambiokol i realistiska spridningsmängder kan ej ensamt klara att tillfredsställa grödors näringsbehov utan kräver kompletterande gödning (Bahr 2016)
Långsiktig kolinlagring i mark (kolsänka) (EBC 2023). I den mån slambiokol bidrar till ökad kolhalt i jorden kan ökad bördighet uppnås (Hosseinian et al. 2024; Ahmad et al. 2022)	Rapport om andel stabil fosfor där växttillgänglighet är svår att kvantifiera (Zhang et al. 2024; Shen et al. 2011)
Potential att sänka Cd/P-kvoten i åkermark (Bahr 2016) (variationer mellan material förekommer och växttillgängligt P har ej beräknats)	Kan ha varierande sammansättning och innehåller tungmetaller (Chiari et al. 2024). Notera att även mineralgödsel kan innehålla vissa tungmetaller (Wei et al. 2020)
I den mån näringsämnen är växttillgängliga recirkuleras de och minskar behov av gruvbrytning. Rapport om direkt växttillgänglig andel P (Zhang et al. 2024).	Svårare med kontrollerade/tidsstyrda gödselinsatser och precisionsodling. Kan slambiokolets potential till långsam frisättning av näring omvandlas till fördel/generera betalningsvilja inom jordbrukssystem?
	Begränsad erfarenhet och kunskap om långsiktiga effekter vid användning i jordbruk

Tabell A.2
För- och nackdelar med slambiokol jämfört med mineralgödsel. (Ordningen av uppradade för- och nackdelar förekommer utan inbördes rankning eller korrelation sinsemellan.)

Sammanfattningsvis visar jämförelsen mellan slambiokol och mineralgödsel att båda metoderna har sina för- och nackdelar när det gäller jordbruk och miljöpåverkan. Mineralgödsel är lätt att hantera och erbjuder hög precision vid näringstillförsel, men dess produktion är energiintensiv och bidrar till betydande växthusgasutsläpp. Slambiokol har lägre klimatpåverkan och recirkulerar innehållande växttillgängliga näringsämnen men kräver tillsats av kompletterande gödning för att tillfredsställa grödors behov. Slambiokolets långsiktiga effekter i jord är ej helt kända då slampyrolys är en ny metod.

Organisk gödsel

Organiska gödningsmedel beskrivs i lagstiftningen vara olika material från djur som används för att upprätthålla eller förbättra växternas näringstillgång samt jordens fysiska och kemiska egenskaper och biologiska aktivitet. Dessa material kan inkludera naturgödsel, icke-mineraliserad guano, innehåll från mag- och tarmsystem, kompost och rötrester (Jordbruksverket 2024). Då rötrester från slam behandlades ovan handlar följande avsnitt primärt om organisk gödsel i form av stallgödsel, kompost och grön-gödsel, som kan produceras lokalt på en gård med djurhållning från egna biprodukter. Organisk gödsel används inom inte minst ekologiskt jordbruk för att förbättra markens bördighet och struktur. Figur A.3 visar en jämförelse mellan slambiokol och stallgödsel.

Figur A.3
Slambiokol och stallgödsel. Foto: EcoTopic AB.

Produktionen av organisk gödsel är betydligt mindre energiintensiv än produktionen av mineralgödsel, vilket gör att den bidrar mindre till växthusgasutsläpp (Gellings & Parmenter 2004). Dessutom bidrar användningen av organiska gödselmedel till att sluta kretsloppet i jordbruket genom att återvinna näringsämnen från djur- och växtavfall. Näringsämnen frigörs gradvis när den organiska substansen bryts ner, vilket ger en

stabil näringstillförsel över tid. Organisk gödsel är också rik på organiskt material, vilket förbättrar jordens struktur, ökar dess vattenhållande förmåga och främjar mikrobiell aktivitet (Singh et al. 2020b; Gellings & Parmenter 2004).

Näringsinnehållet i organisk gödsel kan vara mycket varierande, vilket gör det svårt att förutse exakt näringstillförsel och därmed den typen av precisionsodling. Det är inte osannolikt att olika typer av organisk gödsel också bär spår av tungmetaller och organiska föroreningar men en uppskattning eller kvantifiering ryms ej inom ramen för detta avsnitt. Som exempel kan dock anges att förekomsten av pyralid, ett bekämpningsmedel som använts inom kommersiella odlingar, fått en del uppmärksamhet för att förekomma i bland annat viss organisk gödsel godkänd för ekologisk odling (Fløistad 2020).

När det gäller jämförelsen mellan slambiokol och organisk gödsel finns det färre incitament för substitution eftersom både slambiokol och organisk gödsel bidrar till cirkulär resursanvändning genom att återföra näringsämnen till jorden och båda verkar ha potential att i olika utsträckning frisätta näring långsamt och på sikt. Slambiokolet saknar dock näringsämnen som en del kväve och innehåller en lägre andel organiskt material. Potentiellt kan organisk gödsel fungera som ett komplement till slambiokolet. Samtidigt spås lantbruk med egen djurhållning och gödsel ha mindre intresse av att använda slambiokol som fosforgödningsmedel då man får in fosfor via djurfoder och sedan recirkuleras det lokalt på gården (Gruvaeus 2024, pers.kom.). Men slambiokolet har fördelen att det är fritt från patogener, ogräsfrön och många organiska föroreningar (Chiari et al. 2024). Slambiokol och organisk gödsel kan båda spela viktiga roller i ett hållbart jordbruk.

I Tabell A.3 jämförs slambiokolets för- och nackdelar med organisk gödsel, med avseende på egenskaper som hantering, klimatpåverkan och användning i jordbruk. Regelverk, mer detaljerade ekonomiska aspekter och relevanta aktörers inställning behandlas närmare i andra delar av rapporten.

Tabell A.3
För- och nackdelar med slambiokol jämfört med organisk gödsel. (Ordningen av uppradade för- och nackdelar förekommer utan inbördes rankning eller korrelation sinsemellan.)

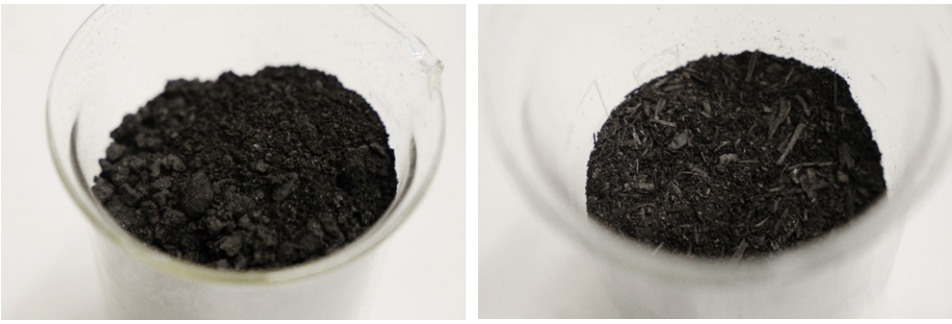
Fördelar med slambiokol jämfört med organisk gödsel	Nackdelar med slambiokol jämfört med organisk gödsel
Fritt från patogener, ogräsfrön och många organiska föroreningar (Chiari et al. 2024)	Kräver framför allt kompletterande kvävegödsling (näringsinnehåll i organisk gödsel varierar beroende på typ)
Medför ingen besvärande lukt vid spridning	Rapport om andel stabil fosfor där växttillgänglighet är svår att kvantifiera (Zhang et al. 2024; Shen et al. 2011)
Långsiktig kolinlagring i mark (kolsänka) (EBC 2023).	Begränsad erfarenhet och kunskap om långsiktiga effekter vid användning i jordbruk

Sammanfattningsvis finns det starkare skäl att undersöka potentialen att substituera mineralgödsel med slambiokol, främst på grund av klimat- och resursskäl, än att ersätta organisk gödsel. Dessutom utgör användning av organisk gödsel en värdefull och logisk del i ett cirkulärt lantbrukssystem. Organisk kväverik gödsel har potential att utgöra ett komplement till slambiokol i jordbrukssammanhang, samtidigt som båda primärt fungerar som långsam näringskälla, men slambiokolets långsiktiga effekter i jord skulle behöva kartläggas vidare.

Biokol

Definitionen och användningen av termen biokol genomgår kontinuerlig utveckling inom forsknings- och industrifältet. European Biochar Certificate (EBC) har utvidgat sin definition från att tidigare omfatta förkolat växtmaterial till att nu inkludera ett bredare spektrum av biomassa, inklusive slam (EBC 2023). I dagsläget godkänner dock EBC endast användning av slambiokol i byggmaterial. Inkluderingen av slam i listan över godkända material har lett till en debatt där vissa aktörer ser pyrolyserat slam som biokol och refererar till det som sådant. Andra menar att skillnaderna mellan pyrolyserat avloppsslam och pyrolyserat växtmaterial är så betydande – både vad

gäller pyrolysteknik, affärsmodeller och applikationsområden – att separata termer bör användas för att tydliggöra dessa olikheter. Figur A.4 visar en jämförelse mellan slambiokol och växtbaserat biokol.



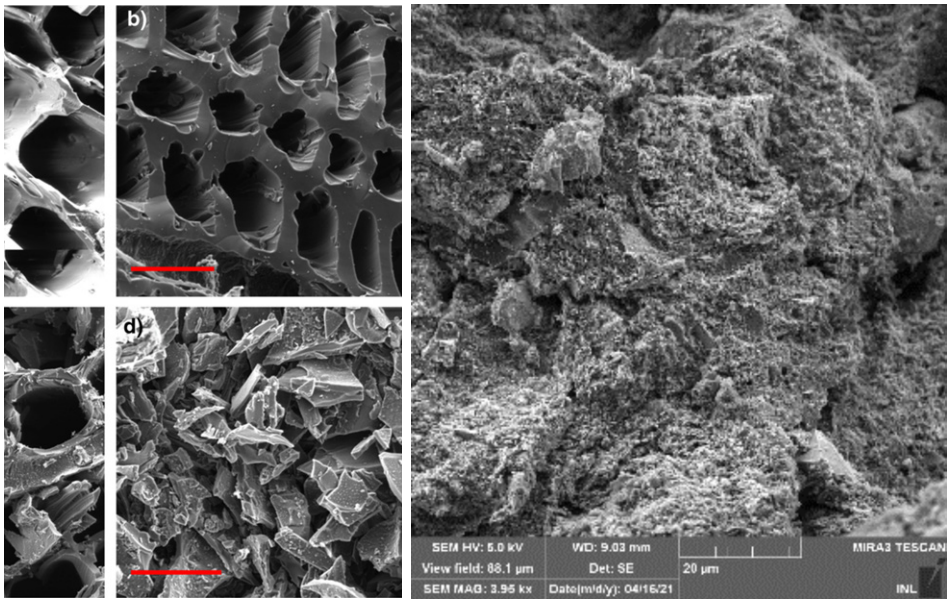
Figur A.4
Slambiokol till vänster och biokol från flisat park- och trädgårdsris till höger. Foto: EcoTopic AB.

I den vetenskapliga litteraturen används termen "biokol" ofta för att beskriva de flesta typer av pyrolyserade material, inklusive avloppsslam. Det finns dock även studier som särskilt undersöker skillnaderna mellan pyrolyserat växtmaterial och avloppsslam, där fokus ligger på variationer i pyrolysprocessen, materialens egenskaper och deras olika tillämpningsområden (Xing et al. 2020). Sammanfattningsvis kräver slambiokol affärsmodeller som tar hänsyn till regulatoriska utmaningar och variationer i råmaterial, medan växtbaserat biokol i dagsläget har mer etablerade affärsmodeller. Båda typerna har potential att bidra till cirkulär ekonomi och hållbarhet, men med olika fokusområden och utmaningar.

Mot bakgrund av detta kan man argumentera för att det är en god idé att tydliggöra vilken typ av produkt och sammanhang man avser genom att använda prefixet "slam" framför "biokol" i fallet med pyrolyserat avloppsslam. Detta skulle bidra till ökad klarhet och minska risken för missförstånd kring produktens ursprung och egenskaper.

Det finns betydande skillnader mellan biokol som framställs från växtrester i allmänhet, och träbaserat material i synnerhet, och slambiokol. Skillnaderna berör till exempel pyrolysteknik, egenskaper och användningsområden, kolsänkepotential och affärsmodeller. Precis som det finns stora variationer mellan olika typer av växtbaserat biokol, så skiljer sig även slambiokol åt beroende på råmaterial och tillverkningsmetod.

Figur A.5 visar skillnaden i struktur mellan ett träbaserat biokol och ett slambiokol.



Figur A.5
Träbaserat biokol till vänster (Bataillou et al. 2022) och slambiokol framställt vid 600 °C till höger (Bataillou 2024, pers.kom.).
Röd linje = 20 µm.

Gällande egenskaper har biokol producerat från icke växtbaserade material (som avloppsslam, gödsel och matavfall) lägre ytarea, kolinnehåll och högre näringsinnehåll jämfört med biokol producerat från växtbaserade material (Tomczyk et al. 2020). En anledning till detta är bland annat det ingående materialets (kol)struktur. Lignin- och cellulosainnehållet som främst förekommer i växtmaterial har betydande inverkan på bildandet av biokol (Tomczyk et al. 2020). Biokol från gödsel, avloppsslam eller jordbruksrester visar högre potential som näringskälla eller oorganisk sorbent (typ näringsämnen). Träbaserat biokol kan i stället ha betydande fördelar för avlägsnande av organiska föroreningar (som antibiotika och bekämpningsmedel), kolinlagring och jordförbättring tack vare högt kolinnehåll samt hög specifik ytarea (Tomczyk et al. 2020).

Generellt sett har slambiokol även en högre askhalt och ett rikare innehåll av näringsämnen som fosfor (Xing et al. 2020; Sørmo et al. 2024b). Angående den höga askhalten är det värt att notera att det finns olika typer av aska. Aska från förbränning av trä är exempelvis ofta rik på mineraler och har en tendens att höja pH-värdet, men en betydande del av askan i slambiokol består av oorganiska material och föroreningar som kvarstår efter pyrolysprocessen, såsom sand, jord, metallpartiklar och mineraler, vilka antingen var en del av den ursprungliga biomassan eller tillkom under hanteringen (Xing et al. 2020). Den typen av aska bidrar inte nödvändigtvis till att höja pH-värdet och har inte samma kemiska påverkan på processer (Fransson 2024, pers.kom.). Ett konkret exempel på skillnader mellan växtbaserade biokol och slambiokol är att majoritetsandelen i biokol från växtbaserade material är kol medan det för slambiokol oftast är aska (Xing et al. 2020; Tomczyk et al. 2020). Skillnaderna mellan växtbaserade biokol och slambiokol betyder att de kommer att lämpa sig olika bra för olika användningsområden.

I Sverige används biokol som jordförbättrare i främst urbana växtbäddar (se Figur A.6) bland annat eftersom det fortfarande är för dyrt för storskalig spridning inom jordbruket. I vissa urbana jordar önskar man inte ha en för stor andel organiskt material, såsom torv eller kompost, som bryts ner och orsakar sättningar. Så kallade skelettjordar är exempel på urbana substrat med hög bärighet som byggs upp av stenskärvor i homogen storleksordning för att skapa hålrum för bland annat trädrötter att kunna spridas och dagvatten att infiltrera (Embrén & Alvem 2017). Dessa stenbaserade jordar innehåller ofta en blandning av biokol och kompost för att bistå växter med fukt och näring. Fördelen med biokol framför exempelvis torv är alltså här att biokolet har en helt annan beständighet, medan båda kan bistå med goda fysikaliska egenskaper till en jord. Samtidigt kan det vara utmanande att ersätta torv med biokol då i synnerhet pH-värdena tenderar att vara väldigt olika. Pimpsten är ett likvärdigt alternativ till biokol i avseendet att det erbjuder en porös struktur med god vattenhållande förmåga till en jord, men utan att innehålla näringsämnen, och samtidigt kan utvinningsprocess och transporter utgöra klimatbelastningar. Inte sällan önskar man att biokolet även ska bistå med en dagvattenrenande funktion. Försök och kartläggning av biokolets roll för att remediera förorenad mark pågår också där biokol visar god potential (Re:source 2023). Frågan är vilka effekter man kan vänta sig över tid och hur slambiokol hade presterat i egenskap av att ha en viss annan slags karaktär. Xing et al. (2020) anger att slambiokol under vissa omständigheter visat potential till tungmetallinbindning (läs mer i avsnitt 3.1.7), vilket är eftertraktat inom urbana kontexter där man samtidigt vill undvika risk för fosforläckage.

Figur A.6
Kolmakadam vid renovering av växtbäddar i Stockholms stad. Foto: EcoTopic AB.

I upphandlingar för urban användning av biokol kan det i dag förekomma specificeringar på biokolets kol- och askhalt som blir svårt för ett pyrolyserat avloppsslam att uppnå. Vidare finns pågående diskussioner om huruvida biokol riskerar att bidra till övergödning genom att läcka tillgänglig fosfor till känsliga vattenrecipienter. I avsnitt 3.1.6 presenteras data på fosfatläckage från olika typer av biokol, vilket tydligt illustrerar hur olika biokol kan prestera beroende på materialets ursprung och egenskaper. Det finns exempel på när man ej karaktäriserat biokolet i försök utan bara refererar till materialet som ”biokol” utan specificering av råmaterial eller produktionsbetingelser (Blecken & Viklander 2022). Möjligen har man då sett det som en homogen produkttyp vilket är ett misstag. Olika typer av biokol har olika effekter på fosfortillgången, och dessa kan förändras över tid. Slambiokolets potential för urban användning kommer troligen kräva forskning och/eller fullskaleförsök för att kartlägga dess specifika egenskaper, särskilt för tillämpningar nära dagvattenhantering. Samtidigt finns det andra urbana grönytor där variationen i fosfortillgänglighet kan tolereras, och där närvaron av fosfor inte utgör ett problem, som exempelvis på gräsytor. Dessa ytor skulle kunna vara lämpliga för användning av slambiokol med oklara fosforegenskaper. Samtidigt är det en applikation som inte innebär att fosfor recirkuleras så samma sätt som inom foder- och matproduktionssystem, det vill säga i jordbruk.

I stället för att fokusera på för- och nackdelar med slambiokol jämfört med växtbaserat biokol kan det vara mer värdefullt att jämföra de bådas egenskaper, se Tabell A.4. Detta tillvägagångssätt ger en mer nyanserad förståelse av båda produkterna och deras potentiella användningsområden som är under utveckling och föremål för en mängd studier. Det är viktigt att notera att det finns betydande variationer inom både växtbaserat biokol och slambiokol. Faktorer som påverkar egenskaperna inkluderar råmaterialets ursprung och sammansättning, pyrolysprocess och temperatur samt eventuell efterbehandling.

	Slambiokol (rötat/orötat)	Biokol (vedbaserat)	Källa
Kolkoncentration	Lägre	Högre	Sørmo et al. (2024b); Zielínska et al. (2015); Xing et al. (2020)
Askhalt	Högre	Lägre	Sørmo et al. (2024b); Xing et al. (2020)
Mineral- och näringsämnen	Högre	Lägre	Xing et al. (2020)
Ytarea/porositet	Lägre	Högre	Tomczyk et al. (2020)
Potentiellt skadliga ämnen	Högre	Lägre	Xing et al. (2020)

Tabell A.4
Generella skillnader i egenskaper mellan slambiokol och vedbaserat biokol.

I Tabell A.5 presenteras exempel på värden som illustrerar de skillnader som kan förekomma mellan olika typer av pyrolyserade material producerade i kommersiella anläggningar. Notera att stora skillnader även kan finnas inom respektive grupp. I kolumnen längst till höger syns AquaGreens beräkningar på Roslagsvattens slambiokols innehåll baserat på dagens avloppsslam. (I avsnitt 3.1.3 finns en tabell med fler exempel på H/C_{org} värden hos olika slambiokol.)

Tabell A.5
Utdrag från (slam) biokolanalyser som EcoTopic fått tillhandahållna i samband med försök med olika producenters (slam)biokol framställda i kommersiella anläggningar (kolumn 1-4). Slammet i slambiokolen kommer från olika reningsverk.

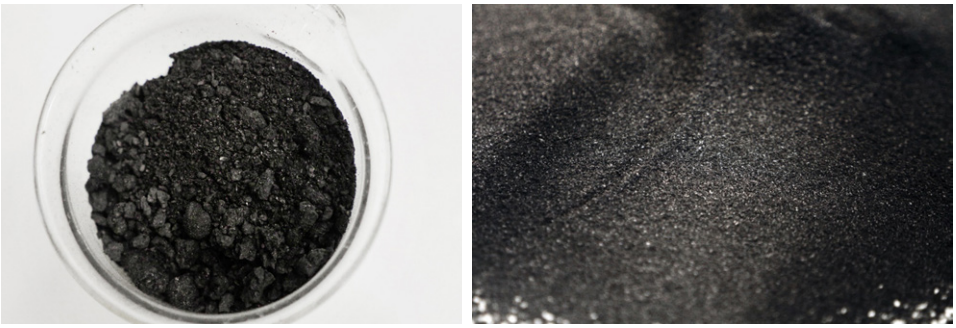
Egenskaper (mätt på torrsubstans)	Slambiokol (orötat)	Slambiokol (rötat)	Biokol (vedbaserat)	Biokol (jordbruksrester)	Beräkningar på Roslagsvattens slambiokol enligt AquaGreen
Tot-C (kolkoncentration) (%(w/w))	29	27	89	70	50
Askhalt (550 °C) (%(w/w))	66	67	7	22	50
pH (CaCl2)	7,7	7,7	10,2	10,2	
BET-yta (specifik yta) (m^2/g)	70	68	405	223	
WHC (vattenhållande förmåga) (%)	92	111	385	183	
H/Corg ratio (molar)	0,44	0,45	0,10	0,30	
Tot-N (%(w/w))	2,88	2,80	0,53	2,68	
Fosfor (P2O5) (%(w/w))	20,4	19,1	3,6	11,7	
Kalium (K2O) (%(w/w))	1,9	1,9	11,9	16,6	

Sammanfattningsvis har biokol och slambiokol olika egenskaper och potentiella användningsområden. Det träbaserade biokolets roll som jordförbättrare är hyfsat etablerad på marknaden för urbana substrat, medan slambiokolets potential här behöver undersökas närmare. Slambiokolets innehåll av näringsämnen och rapporterade potential som långsam näringsgödning öppnar för användning inom jordbruk, i synnerhet om priset är lägre än det för växtbaserade biokol. Samtidigt kan förekomsten av tungmetaller utgöra en utmaning för denna applikation (se avsnitt 3.1.7).

Aktivt kol

Aktivt kol används ofta för att filtrera föroreningar från vatten och har använts som filter på svenska vattenreningsverk i många år. Det används främst för att avlägsna syntetiska och naturliga organiska ämnen samt andra substanser som kan påverka dricksvattnets

smak och lukt. Det tillverkas oftast från fossilt kol eller förnybara material som kokosnötskal eller trä (Baresel et al. 2022). Aktivt kol har länge använts för att rena och avfärga inom läkemedels-, kemi- och livsmedelsindustrin. Figur A.7 visar en jämförelse mellan slambiokol och aktivt kol.



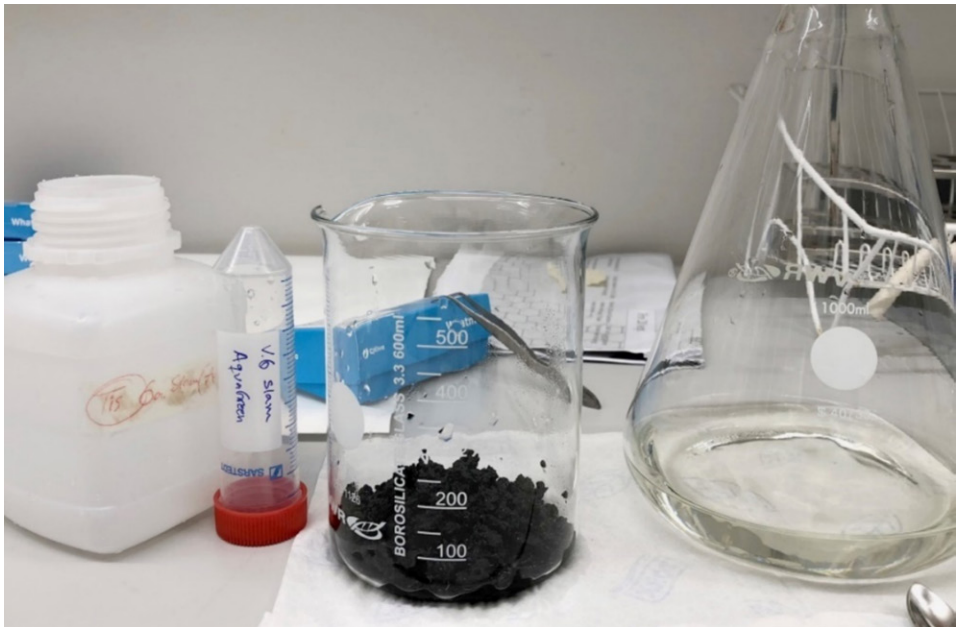
Figur A.7
Slambiokol till vänster och aktivt kol till höger. Foto: EcoTopic AB.

Aktivt kol kan framställas från nästan alla typer av kolrikt organiskt material och karaktäriseras av högt kolinnehåll, mycket hög specifik ytarea och porös struktur med många mikroporer som gör det möjligt att effektivt sorbera organiska föroreningar samt vissa oorganiska inklusive en del tungmetaller (Alfa Chemical 2022). Föroreningar kan bindas fysiskt i kolets porstruktur genom *absorption*, där den kemiska ytan spelar mindre roll men där porstorleksfördelningen hos kolet behöver vara rätt för att kunna rymma föroreningen. *Adsorption* av en förorening till ytan av kolet styrs i stället av dess kemiska egenskaper och påverkas av faktorer såsom laddning, askhalt och pH (Alfa Chemical 2022; Callegari & Capodaglio 2018). Aktivt kol kan användas både i filtersystem och för markremediering, där det hjälper till att binda och stabilisera vissa föroreningar och därmed förhindra deras spridning till närliggande ekosystem (Callegari & Capodaglio 2018).

Trots de många fördelarna med aktivt kol, finns det utmaningar kopplade till dess produktion. Aktivt kol framställs genom en process som innefattar höga temperaturer och ytterligare aktiveringssteg vilket är resursintensivt (Callegari & Capodaglio 2018). Jämfört med aktivt kol kan biokol betraktas som ett potentiellt kostnadseffektivt alternativ. Produktionen av biokol kräver mindre energi, och råmaterialet är ofta mindre kostsamt, särskilt när det erhålls från urbant avloppsslam (Callegari & Capodaglio 2018). Detta gör slambiokol till ett billigare alternativ som ibland kunnat uppvisa jämförbara, ibland till och med bättre, resultat för immobilisering av vissa föroreningar (Zhou et al. 2017; Callegari & Capodaglio 2018; Krahn et al. 2022). Samtidigt är slambiokol ett material med betydligt lägre kolhalt och högre askhalt än material som traditionellt utgör råvara för aktivering av kol. Enligt Jacobi, leverantör av aktiva kol, har flera av deras aktiva filterkol en askhalt på max 10 % (Magnusson 2024, pers.kom.).

Några studier har visat att slambiokol kan vara lika effektivt, ibland till och med mer, än aktivt kol när det gäller att sorbera och immobilisera vissa tungmetaller, organiska föroreningar och PFAS från vattenlösning och i jord (Callegari & Capodaglio 2018; Krahn et al. 2022; Sørmo et al. 2024b). Trots att det finns stora skillnader mellan aktivt kol och slambiokol, i synnerhet när det gäller kolkoncentration och specifik yta – där aktivt kol från träbaserade material ofta har en kolkoncentration på omkring 90 % och en specifik yta som kan vara upp till 300 m^2/g eller ibland närmare 1 000 m^2/g (Lahti et al. 2017) – kan vissa slambiokol ändå uppvisa effektiva sorptionsegenskaper. Detta rapporteras bland annat bero på att porstorleksfördelningen hos slambiokol väl kan matcha föroreningens partikelstorlek, samt förekomsten av funktionella grupper på ytan (Sørmo et al. 2024b; Singh et al. 2020a; Krahn et al. 2022).

Figur A.8 kommer från ett filtertest där EcoTopic som försöksansvarig tillsammans med Linnéuniversitetet, Kalmar kommun och Växjö Småland Airport testar olika biokols potential att filtrera PFAS från grund- och dagvatten. Ett av flera testade slambiokol var tillhandahållet av AquaGreen.



Figur A.8
Filtertest där olika biokols potential att filtrera PFAS från grund- och dagvatten testas. Foto: EcoTopic AB.

Beroende på den slutliga applikationen för ett filter kommer en kolsänka från biokol att kunna tillgodoräknas eller inte. Om avsikten är att destruera kolfiltret försvinner kolsänkepotentialen, vilket är ovanligt inom biokolanvändning eftersom materialets klimatnytta som kolsänka ofta är en central anledning till dess användning. Vidare utgör inte heller en filterapplikation något som direkt recirkulerar fosfor vilket är en drivkraft för slampyrolys som hanteringsmetod.

Precis som att aktivt kol kan tillverkas från en rad kolrika organiska material, finns också möjligheter att ytterligare förbättra immobiliseringseffektiviteten hos slambiokol genom aktiveringsprocesser (Baresel et al. 2022). Aktivering av kol kan uppnås genom både fysisk och kemisk behandling, där fysisk aktivering ofta är mer ekonomisk och miljövänlig (Singh et al., 2020). Chen et al. (2022) undersökte aktivering av slam i form av kemisk tillsatts (5M $ZnCl_2$) innan pyrolys (650 °C i 2 h). Denna behandling visade sig ha betydande effekt på porositet och specifik yta, vilket är viktiga egenskaper för en sorbent. I en annan rapport jämförde man effekten av att på motsvarande sätt aktivera rötat och orötat slam följt av pyrolys (500 °C i 2 h) (Tay et al. 2001). Tay et al. (2001) konkluderade att orötat slam gav upphov till en produkt som utgjorde ett bättre filtermaterial tack vare högre specifik yta, porvolym och kolkoncentration.

Värt att notera är att den mesta vetenskapliga litteraturen i sammanhanget är gjord med syntetiska vatten och under kontrollerade former i laboratoriemiljö, troligen på grund av de komplexa kombinationerna av föroreningar och joner som finns i naturliga system och som gör försöken svåra att replikera och resultaten svårare att tolka. Kombinationerna kan ha stor inverkan på kolets förmåga att adsorbera föroreningar (Callegari & Capodaglio 2018). Rekommendationer vid användande av aktivt kol går ut på att man bör genomföra experiment med olika typer av kol för att utvärdera resultaten (Malovanyy et al. 2021; Alfa Chemical 2022), och detsamma bör rimligen gälla för slambiokol som filter. Det finns mängder av litteratur på området. En rekommendation kan vara att arbeta mot en kartläggning genom en fördjupad litteraturstudie och komplettera den med praktiska försök inför en applikation för att verifiera potentialen.

I Tabell A.6 nedan jämförs slambiokolets för- och nackdelar med kommersiellt aktivt kol, med avseende på egenskaper som hantering, klimatpåverkan och användning som filter. Regelverk, mer detaljerade ekonomiska aspekter och relevanta aktörers inställning behandlas närmare i andra delar av rapporten.

Fördelar med slambiokol jämfört med aktivt kol	Nackdelar med slambiokol jämfört med aktivt kol
Billigt råmaterial vilket bör kunna göra det till en billigare produkt (Callegari & Capodaglio 2018)	Recirkulering av fosfor uteblir vid filteranvändning (ej nackdel jämfört med aktivt kol utan jämfört med jordbruksapplikation)
Tillverkningsprocess möjliggör destruering/avskiljning av många organiska föroreningar (Chiari et al. 2024)	Utgör ej kolsänka förrän det applicerats på ett sådant vis att det ej längre riskerar att återgå till atmosfären som koldioxid (EBC 2021) (ej nackdel jämfört med aktivt kol utan jämfört med jordapplikation)
Mindre klimatpåverkan vid tillverkning (Callegari & Capodaglio 2018)	Oklar avsättning för använt filter (Callegari & Capodaglio 2018) Är det ekonomiskt motiverat att regenerera förbrukat filter?
Egenskaper kan till viss del anpassas genom ändringar i pyrolystemperatur	Variationer i slammet som råmaterial kan ge varierande sorptionskapacitet hos slambiokol vilket applikationen behöver ha tolerans för
Slambiokol kan utgöra råmaterial för vidare aktivering (Baresel et al. 2022; Chen et al. 2022; Tay et al. 2001)	

Tabell A.6
För- och nackdelar med slambiokol jämfört med kommersiellt aktivt kol. (Ordningen av uppradade för- och nackdelar förekommer utan inbördes rankning eller korrelation sinsemellan.)

Sammantaget visar viss forskning att slambiokol kan generera jämförbara resultat med aktivt kol, alternativt utgöra råmaterial för aktivering särskilt i applikationer där kostnadseffektivitet är avgörande, lokalt vid avloppsreningsverk som pyrolyserar slam och där slambiokolets filtereffekter verifierats. Samtidigt är de fysikaliska och kemiska egenskaperna mellan slambiokol och aktivt kol väldigt olika vilket bör leda till skilda resultat. Med ytterligare utveckling och optimering av produktionsprocesserna kan slambiokol potentiellt spela en viktig roll i framtida reningsstrategier, men mer arbete och försök krävs för att kartlägga och verifiera potentialen. Filterapplikationen säkrar ej direkt kolsänkan eller utgör en metod för att recirkulera fosfor. Dessutom måste avsättning för det förbrukade filtret säkras.

Bilaga B Genomförande av intervjuer

I följande avsnitt beskrivs genomförandet av intervjuer med intressenter för slambiokol, följt av en sammanställning av intervjuade personer.

Intervjumetod

EcoTopic genomförde intervjuerna via telefon under perioden augusti–oktober 2024 för att möjliggöra en mer nyanserad dialog och ge möjlighet till följdfrågor, speciellt med tanke på att kunskapen om slambiokol som begrepp och material är nära obefintlig. Telefonsamtal valdes framför skriftliga enkätsvar eftersom de ger en mer utförlig och dynamisk bild av respondenternas perspektiv och eftersom det underlättar för den intervjuade parten att beskriva sin uppfattning och attityd om slambiokol som de själva inte har någon erfarenhet av utan i stället behöver resonera kring. I vissa fall användes mailkorrespondens för kompletterande och uppföljande information.

Intervjuerna baserades på ett antal frågor inom kategorierna erfarenhet och kunskap om avloppsslam och slambiokol, värdet av miljö- och klimateffekter, användning av avloppsslam och slambiokol, ekonomi samt praktisk tillämpning vid spridning. Frågorna föregicks och kompletterades av information om slambiokol för att ge respondenten tillräcklig kunskap för att kunna ge sin bedömning och beskriva sin attityd.

För att säkerställa en objektiv analys av intervjusvaren granskade EcoTopic samtliga svar utifrån ett kvalitativt perspektiv, där vi identifierade och kategoriserade centrala teman och mönster. I stället för att citera enskilda svar har vi valt att sammanfatta och analysera intervjumaterialet tematiskt. Detta gjordes dels för att bevara respondenternas anonymitet, dels för att ge en mer överskådlig och sammanhängande bild av de gemensamma insikterna som framkom i intervjuerna. I och med att de intervjuade parterna frågas om deras syn på potentialen för slambiokol, som ännu inte finns tillgängligt, i stället för att bedöma en existerande produkt gjordes bedömningen att denna metod ger mest värde för rapporten.

Intervjuade personer

Tabell B.1 presenterar en sammanställning av de intressenter inom slambiokol som intervjuats inom ramen för projektet. Det kan noteras att ytterligare personer kontaktades men av olika anledningar inte kunde delta i intervju.

Namn	Organisation	Roll
Britt-Marie Alvem	Stockholms stad	Trädspecialist
Carl Gudmundsson	Kryger	Lantbrukare
Christer Pålsson	Krageholm Drifts	Lantbrukare
Claes Johansson	Lantmännen	Hållbarhetschef
Edvard Hamilton	Hjelmsäters Egendom	Lantbrukare
Erik Johansson	Tumbäcks Gård	Lantbrukare
Ingemar Gruvaeus	Yara	Chefsagronom (erfarenhet som driftsledare inom jordbruk)
Johanna Öwall	Svenska Foder	Ansvarig växtodling
Jonas Sjunnesson	Slättäng	Lantbrukare
Katja Kiviaho Nordström	Hasselfors	Circular Solutions Manager
Lisa Trolle	Svenska kvarnföreningen	Ordförande
Markus Hoffman	LRF	Hållbarhetsexpert
Mattias Persson	Econova	Product Development Manager
Mikael Jeppsson	Lantmännen	Spannmålschef
Niklas Vestin	Rölunda Gård	Marknadschef
Pontus Thureson	Foder & Spannmål	VD
Roland Höckert	Godegården	Lantbrukare
Tomas Larsson	Toleruds Gård	Lantbrukare
Victor Ebel	Svenska Foder	Spannmålschef

Tabell B.1
Projektets intervjupersoner.

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma
BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma
TELEFON 08-506 002 00
E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se