

## Final report

### Kan förbränning av fjäderfägödsel förbättra hållbarheten?

**Project number:**

JTI-22-83-727

**Budget:**

927 989 SEK

**Project period:**

2023-2025

**Main applicant:**

Erik Sindhøj, RISE, erik.sindhoj@ri.se

**Co-applicant(s):**

Andras Baky, RISE

Martin Ingemarsson, Bjärefågel i Torekow AB

## Part 1.1: Abstract

This study evaluated the sustainability of thermochemical treatment of poultry manure as an alternative to conventional management in Swedish poultry production. Combustion and pyrolysis were tested to assess energy recovery potential, nutrient retention, and environmental performance. Laboratory analyses determined heating value, nutrient composition, and the chemical characteristics of ash and biochar. Soil incubation tests examined nutrient availability, and a system-level assessment covered both economic and environmental impacts.

Poultry manure showed a high energy content (12–13 MJ kg<sup>-1</sup> DM) and significant nutrient concentrations, making it suitable for energy recovery. Combustion in existing biofuel boilers proved the most cost-effective option, providing renewable heat with low investment needs. Pyrolysis offered potential for biochar production and carbon sequestration but required higher capital and energy input. Both ash and biochar were rich in phosphorus and potassium but contained little nitrogen and had low short-term nutrient availability.

Thermochemical conversion can serve as a complementary treatment for farms with high energy demand or limited spreading area, but the substantial nitrogen losses limit its circularity. Future development should focus on nitrogen recovery, clearer regulations for the agricultural use of ash and biochar, and sustainability criteria that balance energy gains with nutrient conservation.

## Sammanfattning

Studien utvärderade hållbarheten hos termokemisk behandling av kycklinggödsel som ett alternativ till konventionell hantering inom svensk fjäderfäproduktion. Förbränning och pyrolys testades med avseende på energiutvinning, näringsinnehåll och miljöprestanda. Laboratorieanalyser bestämde energivärde, näringsammansättning och egenskaper hos aska och biokol, medan mark inkubationen bedömde växtnäringstillgänglighet. En systemanalys omfattade både ekonomi och miljöpåverkan.

Kycklinggödsel hade högt energivärde (12–13 MJ kg<sup>-1</sup> TS) och betydande näringsinnehåll, vilket gör den lämplig för energiutvinning. Förbränning i befintliga biobränslepannor var mest kostnadseffektivt, medan pyrolys gav möjlighet till biokolproduktion och kolinlagring men krävde högre investeringar och energiåtgång. Aska och biokol var fosfor- och kaliumrika men kvävefattiga och hade låg kortsiktig växtnäringseffekt.

Termokemisk behandling kan fungera som ett komplement till nuvarande gödselhantering, särskilt på gårdar med stort värmebehov eller begränsad spridningsareal, men kväveförlusterna minskar dess cirkularitet. Fortsatt utveckling bör inriktas på tekniker för kväveåtervinning, tydligare regler för användning av aska och biokol samt hållbarhetskriterier som balanserar energiutbyte och näringshushållning.

## Part 1.2: Slutrapporten

### 1. Inledning

Kycklinggödsel är ett näringsrikt restmaterial med höga halter av kväve, fosfor och kalium. Det gör gödseln värdefull som växtnäringskälla men samtidigt svår att hantera inom ramen för nuvarande svenska och europeiska regler. Enligt nitratdirektivet och de nationella bestämmelserna från Jordbruksverket får fosfortillförseln från stallgödsel inte överstiga i genomsnitt 22 kg P ha<sup>-1</sup> år<sup>-1</sup> beräknat över en femårsperiod. För fjäderfäproducenter innebär detta att stora spridningsarealer krävs, vilket medför ökade kostnader och logistiska

utmaningar. Lagring och spridning av gödsel kan dessutom ge upphov till ammoniakförluster, luktproblem och risk för övergödning. Sammantaget påverkar detta både lönsamhet och miljöprestanda i produktionen.

Det finns därför ett växande behov av alternativa behandlingsmetoder som kan förbättra hållbarheten i gödselhanteringen, minska miljöpåverkan och samtidigt bidra till gårdarnas energiförsörjning. Termokemisk omvandling, genom förbränning eller pyrolys, har uppmärksammats som ett lovande alternativ för att omvandla näringsrika restströmmar till energi och växtnäring i mer koncentrerad form. Kycklinggödsel har jämfört med annan stallgödsel en relativt låg vattenhalt och därmed ett högt energiinnehåll, vilket gör den särskilt lämplig för dessa processer. Vid förbränning kan förnybar värme eller el produceras samtidigt som en fosfor- och kaliumrik aska bildas. Pyrolys, som sker vid 350–600 °C i syrefattig miljö, ger bio-olja, gas och biokol som kan användas för kolinlagring och markförbättring. Båda processerna reducerar volymen, eliminerar patogener och lukt samt underlättar transport och lagring.

Internationella studier har visat att förbränning av fjäderfägödsel kan minska utsläppen av metan, lustgas och ammoniak jämfört med direkt spridning, samtidigt som en stabil PK-gödsel erhålls (Billen et al., 2015). Pyrolys ger dessutom möjlighet att producera biokol för markförbättring och långsiktig kolinlagring (Yildiz et al., 2019; Glaser och Lehr, 2019). Under svenska förhållanden saknas dock tillräcklig kunskap om teknikernas prestanda, ekonomi och miljöpåverkan. Hög askhalt samt förekomst av klor och kalium kan orsaka driftproblem i pannor, och balansen mellan energivinster, näringsåterföring och emissioner är ännu inte väl kartlagd.

Projektet ”Kan termokemisk omvandling av kycklinggödsel öka hållbarheten?” initierades för att utvärdera om kycklinggödsel kan behandlas genom förbränning eller pyrolys på gårds- eller regional nivå för att öka lönsamheten och minska miljöpåverkan. Studien fokuserade på svenska förhållanden och befintlig infrastruktur inom små och medelstora fjäderfäanläggningar, där gödselhantering ofta utgör en betydande kostnad och miljöutmaning.

Arbetet genomfördes av RISE – Research Institutes of Sweden i samarbete med Bjärefågel AB under perioden 2023–2025. Projektet omfattade en litteraturstudie av tillgängliga tekniker och tidigare forskning, insamling och analys av kycklinggödsel från svenska gårdar samt laborieförsök med förbränning och pyrolys för att bestämma energi- och näringsinnehåll i gödsel, aska och biokol. Resultaten användes som underlag för en teknisk-ekonomisk och miljömässig systemanalys som jämförde termokemisk behandling med konventionell markanvändning av gödsel.

Projektet bidrar med ny kunskap som kan stödja beslut om hållbar gödselhantering inom svensk fjäderfäproduktion och belyser hur termokemisk omvandling kan bli en del av ett cirkulärt och klimatsmart jordbrukssystem.

## **2. Material och metoder**

### **2.1 Litteraturstudie**

En inledande litteraturstudie genomfördes för att sammanställa kunskap om befintliga tekniker för termokemisk omvandling av kycklinggödsel samt deras tekniska mognad, energibalans, emissionsnivåer och potential för näringsåterföring. Studien omfattade både vetenskapliga publikationer och tekniska rapporter, samt kontakt med leverantörer av småskaliga pyrolys- och förbränningstekniker. Resultaten användes som underlag för val av försöksupplägg och för att sätta de experimentella resultaten i ett bredare sammanhang.

## 2.2 Fallstudie: Bjärefågel

Fallstudien baserades på Bjärefågel i nordvästra Skåne, en frigående uppfödning med sju stall och en total uppvärmd yta på cirka 3 600 m<sup>2</sup>. Gården producerar cirka 197 500 kycklingar per år, fördelat på sex uppfödningssomgångar. Kycklingarna växer på ett tunt ströbäddssystem av sågspån och kutterspån, och den årliga gödselmängden uppgår till ungefär 288 ton (färskvikt) med cirka 35–40 % torrsubstans. Gödseln lämnas efter uppstädning till annan gård utan ekonomisk ersättning. Gården använder idag pelletseldade pannor med en sammanlagd effekt på 280 kW för att tillgodose ett årligt värmebehov på 1,9 GWh.

## 2.3 Provtagning och laboratorieanalyser

Gödselprover samlades in från kycklingstallar hos Bjärefågel samt från tre andra svenska gårdar för att få jämförande data från olika produktionssystem (slaktkyckling och värphöns). Efter provtagning frystes materialet in innan laboratorieanalyser genomfördes.

Analyserade parametrar:

- Torrsubstans (TS) och glödförlust (VS), bestämda enligt standardmetoder vid 105 °C respektive 550 °C.
- Totalkväve (N), fosfor (P), kalium (K) samt mineraler (Ca, Mg, Na, S, Fe, Mn, Zn, Cu) analyserades av Agrilab AB.
- Energivärde (Higher Heating Value, HHV) analyserades vid Institute of Fluid Flow Machinery (Gdańsk, Polen).
- Gödselprover användes för laborieförbränning och pyrolys, där aska respektive biokol togs tillvara för vidare analys av näringsinnehåll och växtnäringstillgänglighet.

## 2.4 Växtnäringstillgänglighet i aska och biokol

För att utvärdera växtnäringstillgängligheten genomfördes jordinkubationsförsök på RISE. Jordprover togs från försöksgården Ulleråker (sandig mo, pH 5,9). Efter torkning och siktning blandades 50 g jord (torrvikt) med gödsel, aska eller biokol motsvarande en fosfortillförsel på gårdsrelevant nivå. Ett icke behandlat kontrollprov ingick, samt varianter med tillägg av mineralkväve (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> motsvarande 200 kg N ha<sup>-1</sup>).

Behandlade jordar inkuberades vid 20 °C i mörker under 90 dagar. Markvattenprover togs efter 7, 14, 30, 60 och 90 dagar för analys av ammoniumkväve (NH<sub>4</sub>-N) och nitratkväve (NO<sub>3</sub>-N). Efter 7, 30 och 90 dagar analyserades även växttillgängligt fosfor (P-AL) samt pH.

## 2.5 Scenariobeskrivning för systemanalys

Tre alternativa hanteringskedjor för gödsel analyserades:

- **Baseline:** Gödseln lämnas till annan gård utan ersättning. Gården värms enbart med inköpta träpellets.
- **Förbränning:** Gödsel blandas med träpellets (40 % fukthalt) och eldas i befintliga pannor. Ingen investering i ny utrustning krävs.
- **Pyrolys:** Gödsel torkas till cirka 10 % fukthalt och förkolning i en ny anläggning. Producerad bio-olja och biokol säljs, medan värme täcker en del av gårdens energibehov.

För varje scenario beskrevs in- och utflöden av material, energi och näringsämnen samt tillhörande kostnader och intäkter.

## 2.6 Teknisk-ekonomisk analys

Den ekonomiska hållbarheten beräknades genom benefit-to-cost ratio (BCR) per ton gödsel över en 15-årsperiod, motsvarande förväntad livslängd för utrustningen.

- Kostnader inkluderade investering, drift, underhåll, energi, personal och skatt.
- Intäkter och undvikna kostnader omfattade värmeproduktion, biokol och bio-olja samt eventuella gödselvärderna.

Diskonteringsräntan sattes till 2 %, och avskrivningstiden till 15 år. Priser och emissionsfaktorer hämtades från svenska källor (t.ex. Energimyndigheten, Vattenfall, Länsstyrelsen).

## 2.7 Miljöanalys

En livscykelanalys (LCA) genomfördes enligt ISO 14040 och 14044 med systemgränser från gödsellagring till användning av restprodukterna (funktionell enhet: 1 ton gödsel). Fyra delsystem inkluderades:

1. lagring, 2) transport, 3) behandling, 4) undviken produktion (gödsel, pellets, olja).

Tre miljöpåverkanskategorier analyserades:

- Klimatpåverkan (GWP100) – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> och N<sub>2</sub>O enligt IPCC (2021)
- Försurning (SO<sub>2</sub>-ekvivalenter) – NH<sub>3</sub> och NO<sub>x</sub> enligt ReCiPe H (2013)
- Övergödning (N-ekvivalenter) – NH<sub>3</sub> och NO<sub>x</sub> enligt Ecoinvent (2024)

Emissionsfaktorer för lagring och spridning hämtades från svenska studier (Rodhe & Karlsson, 2002), medan processdata för förbränning och pyrolys baserades på Billen et al. (2015) respektive Boras et al. (2020).

## 3. Resultat

### 3.1 Näringsinnehåll och energivärde i kycklinggödsel

Resultaten av grundanalyserna visas i Tabell 1. Torrsubstanshalten var i genomsnitt 37 %, med ett högt innehåll av N, P och K, vilket bekräftar gödselns potential som både bränsle och näringskälla.

Tabell 1. Grundläggande egenskaper hos kycklinggödsel (Bjärefågel).

Parameter	Enhet	Medelvärde	Spridning (min–max)	Kommentar
Torrsubstans (TS)	%	37	33–40	Relativt torr gödsel, lätt att hantera
Glödförlust (VS)	% av TS	66	—	Mått på organiskt innehåll
Totalkväve (N)	% av TS	5,6	5,1–6,2	Högt innehåll
Fosfor (P)	% av TS	2,3	2,0–2,5	P-rik
Kalium (K)	% av TS	2,2	1,9–2,4	—
HHV (energivärde)	MJ kg <sup>-1</sup> TS	12,4	11,8–13,0	Likvärdigt med träflis

### 3.2 Aska och biokol – sammansättning och växtnäring

När gödseln behandlades termokemiskt kvarstod 20 % aska vid förbränning och 35 % biokol vid pyrolys. Näringsämnen koncentrerades i restprodukterna men kvävet förlorades nästan helt vid förbränning (Tabell 2).

Tabell 2. Näringsinnehåll i restprodukter från termokemisk behandling (% av TS).

Ämne	Aska	Biokol	Kommentar
Totalkväve (N)	< 0,2	1,1	Kväve avgår som gas
Fosfor (P)	11,2	4,8	Koncentreras i askan
Kalium (K)	8,1	3,6	Delvis förlorat i gasfas
Kalcium (Ca)	12,5	4,2	Stark basisk effekt

Ämne	Aska	Biokol	Kommentar
Magnesium (Mg)	3,2	1,6	—
pH	11,8	9,2	Hög neutraliseringspotential

### 3.3 Växtnäringstillgänglighet i inkubationsförsöken

Växttillgänglig fosfor (P-AL) var högst i gödselbehandlingen (4,3 mg 100 g<sup>-1</sup>), lägre i biokol (2,9 mg) och lägst i aska (1,8 mg). Jordens pH ökade med 0,4 enheter för biokol och 1,2 enheter för aska, vilket tyder på potentiell kalkverkan i sura jordar.

### 3.4 Ekonomisk utvärdering

Den ekonomiska analysen visade tydliga skillnader i lönsamhet mellan de tre analyserade scenarierna (Tabell 3). Förbränning av kycklinggödsel i befintliga pellets pannor, med en inblandning på cirka 20 % gödsel, framstod som det mest ekonomiskt fördelaktiga alternativet. Den höga benefit-cost ratio (BCR = 4,5) berodde främst på ersatt inköpt energi och låga investeringskostnader, vilket möjliggör ett snabbt genomförande på gårdsnivå.

Pyrolysalternativet uppvisade däremot en lägre lönsamhet (BCR = 1,7), främst till följd av högre investeringskostnader och energibehov vid torkning av gödseln. Känslighetsanalysen indikerade att pyrolys kan bli mer konkurrenskraftig vid högre elpris eller om biokol säljs till ett marknadsvärde över cirka 3 kr kg<sup>-1</sup> TS. Baslinjen, som representerar nuvarande hantering där gödseln bortskänks, saknade ekonomiska intäkter men fungerade som jämförelsegrund för systemanalysen.

Tabell 3. Resultat av den ekonomiska analysen för de tre scenarierna.

Scenario	Huvudsakliga antaganden	Investering (kSEK)	Årlig nettovinst (kSEK år <sup>-1</sup> )	BCR	Kommentar
Baslinje	Pelletseldning, gödsel bortskänks	0	—	—	Referensscenario
Förbränning	20 % gödselinblandning i bef. panna	70	320	4,5	Hög lönsamhet, låg risk
Pyrolys	Ny anläggning, torkning krävs	1 200	140	1,7	Lönsamhet beroende av energipris och biokolvärde

### 3.5 Miljömässig utvärdering

Livscykelanalysen (LCA) visade skillnader mellan de tre scenarierna vad gäller klimatpåverkan, försurning och övergödningspotential (Tabell 4). Baslinjen, där gödseln lagras och sprids utan energiutvinning, uppvisade den lägsta klimatpåverkan (−51 kg CO<sub>2e</sub> ton<sup>-1</sup>) tack vare full återföring av näringsämnen till åkermark.

Förbränningsalternativet genererade en klimatpåverkan på 125 kg CO<sub>2e</sub> ton<sup>-1</sup>, huvudsakligen till följd av kväveförluster under förbränning och minskat näringsvärde i askan. Pyrolys gav något högre klimatpåverkan (165 kg CO<sub>2e</sub> ton<sup>-1</sup>) eftersom energiåtgången för torkning vägde upp den positiva effekten av kolinlagring i biokol.

Tabell 4. Miljöpåverkan per ton gödsel (funktionell enhet = 1 t gödsel).

Påverkanskategori	Enhet	Baslinje	Förbränning	Pyrolys	Kommentar
Klimatpåverkan (GWP <sub>100</sub> )	kg CO <sub>2e</sub> t <sup>-1</sup>	−51	125	165	Baslinjen bäst för klimat

Påverkanskategori	Enhet	Baslinje	Förbränning	Pyrolys	Kommentar
Försurning	g SO <sub>2</sub> e t <sup>-1</sup>	280	350	310	Högre vid förbränning
Övergödning	g Ne t <sup>-1</sup>	82	60	58	Lägre vid termokemisk behandling

Både förbränning och pyrolys minskade dock den potentiella övergödningsbelastningen jämfört med baslinjen, eftersom utsläppen av ammoniak och nitrat vid lagring och spridning eliminerades. Försurningspotentialen var något högre i förbränningsalternativet på grund av ökade ammoniakemissioner i processen.

### 3.6 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen visade att resultaten påverkas mest av antaganden kring energipris, gödselns fukthalt och värdet på biokol. En ökning av elpriset med 50 % förbättrade lönsamheten för pyrolys med cirka 40 %. Om biokol antas ha ett kolkrediterat värde (1,5–2,0 kr kg<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>e lagrad), kan klimatpåverkan minska med upp till 60 kg CO<sub>2</sub>e ton<sup>-1</sup> gödsel. För förbränningsalternativet var resultaten stabila inom ±15 % vid varierande pelletpris och kväveförluster.

## 4. Diskussion

Resultaten visar att termokemisk behandling av kycklinggödsel är tekniskt möjlig och kan bidra till både energiproduktion och växtnäringsåtervinning. Samtidigt framgår att processval och driftförutsättningar starkt påverkar både ekonomi och miljöpåverkan.

### 4.1 Teknisk och agronomisk potential

De uppmätta energivärdena bekräftar att kycklinggödsel har ett högt värmeinnehåll (12–13 MJ kg<sup>-1</sup> TS), vilket överensstämmer med tidigare studier (Yildiz et al., 2019; Hussein et al., 2017). Detta gör substratet särskilt lämpat för sameldning i befintliga gårdspannor, förutsatt att askbildning och korrosionsrisk kan hanteras. Förbränning kan därmed snabbt implementeras på gårdar som redan använder biobränslepannor, medan pyrolys kräver ny teknik och högre investering.

De laboratoriska resultaten visar att både aska och biokol kan återföras till åkermark som långsamma fosforkällor, men med låg kortsiktig växtnäringsstillgänglighet. Detta ligger i linje med tidigare observationer att fosfor i biokol och aska ofta föreligger i mer stabila mineralformer såsom Ca- och Mg-fosfater (Zornoza et al., 2016; Glaser och Lehr, 2019). För sura jordar kan dessa material bidra till pH-höjning och fungera som långsiktiga fosforkällor genom att binda fosfor i stabila, svårlösliga mineralformer.

Kväveförlusterna var omfattande i båda processerna, vilket bekräftar tidigare studier som visat att >90 % av kvävet avgår vid temperaturer över 400 °C (Gao et al., 2020). Framtida tekniklösningar bör därför fokusera på att återvinna gasformigt kväve från rökgaser eller process gas, till exempel genom syra absorption eller ammoniumsulfat-fällning (jfr. Billen et al., 2015; Cordeiro & Sindhøj, 2024).

### 4.2 Ekonomiska förutsättningar

Den ekonomiska analysen visar att förbränning är det mest lönsamma alternativet under nuvarande förutsättningar. Detta beror främst på att tekniken kan integreras i befintlig värmeanläggning och ge direkt ersättning för köpt energi. Pyrolys har högre investeringskostnader men kan bli konkurrenskraftigt om marknaden för biokol utvecklas ytterligare eller om kolinlagring tilldelas ekonomiskt värde (Lee et al., 2023).

Ett viktigt resultat är att lönsamheten för båda teknikerna är starkt beroende av energipriset och fukthalten i gödseln. Vid högre elpriser eller om torkning kan ske med spillvärme från produktionen förbättras resultaten avsevärt.

### 4.3 Miljömässiga konsekvenser

Livscykelanalysen visar att termokemisk behandling inte automatiskt leder till minskad klimatpåverkan jämfört med konventionell gödselhantering. Detta beror främst på att växtnäringens innehåll i de termokemiska produkterna är lägre, vilket kräver kompensatorisk användning av mineralgödsel. Liknande resultat har rapporterats i tidigare studier av Billen et al. (2015) och Azzi et al. (2021).

Trots högre klimatpåverkan ger både förbränning och pyrolys lägre övergödningsrisk, eftersom ammoniakemissioner från lagring och spridning elimineras. Pyrolys erbjuder dessutom en potentiell klimatvinst genom kolinlagring i biokol, vilket på längre sikt kan neutralisera delar av processens utsläpp (Jokubé et al., 2025).

För att termokemisk behandling ska ge tydlig miljönytta krävs dock att tekniken integreras i ett slutet kretslopp där energi, näringsämnen och restprodukter nyttiggörs fullt ut. Kombinationer med ammoniakåtervinning, rökgaskondensation eller aska-upgradering, som i EasyMining's Ash2Phos-process, är exempel på möjliga lösningar.

### 4.4 Systemperspektiv och implementering

Ur ett systemperspektiv kan termokemisk behandling bidra till energi- och näringsmässig självförsörjning på gårdar med överskott av fosfor. Tekniken kan minska behovet av långväga gödseltransporter och därmed även indirekta utsläpp. I regioner med fosforöverskott, som sydvästra Sverige, kan aska eller biokol användas för att producera transportabla gödselprodukter med lägre volym och högre näringskoncentration.

För att möjliggöra bred implementering krävs dock tydligare regelverk och incitament. Dagens lagstiftning kring avfallsförbränning och biokolklassning är ännu inte anpassad till småskaliga gårdsanläggningar. Vidare behövs riktlinjer för hur aska och biokol får användas som gödselmedel utan att klassas som avfall, något som även påpekats i EU:s senaste Soil Health and Circular Fertiliser-initiativ (European Commission, 2024).

### 4.5 Osäkerheter och behov av fortsatt forskning

Känslighetsanalysen visade att resultaten påverkas mest av antaganden kring energipriser, gödselns fukthalt och biokolens marknadsvärde. För att öka precisionen i framtida bedömningar krävs mer data om verklig drift, emissioner och produktkvalitet under svenska förhållanden. Fältförsök bör också genomföras för att utvärdera fosfortillgänglighet, kolstabilitet och långsiktiga markeffekter vid upprepad tillförsel.

## 5. Slutsatser

Projektet visar att termokemisk behandling av kycklinggödsel är tekniskt möjlig och kan vara relevant för svenska gårdsförhållanden, men att dess nytta beror starkt på processval och hur restprodukterna hanteras. Förbränning i befintliga biobränslepannor är det mest praktiskt och ekonomiskt gångbara alternativet. Det kräver små tekniska anpassningar, kan genomföras direkt på gårdsnivå och ger tydliga energivinster. Processen möjliggör lokal energiåtervinning, men leder till fullständig kväveförlust, vilket begränsar potentialen för näringsåterföring.

Pyrolys erbjuder större cirkulär potential genom att producera biokol som kan användas i jordbruket. Trots högre investeringskostnader och energibehov kan pyrolys bli ekonomiskt

attraktiv om biokol ges ett kolinlagringsvärde eller säljs på marknaden som jordförbättringsprodukt.

Både aska och biokol är rika på fosfor och kalium och kan fungera som långsamma fosforkällor i sura jordar, men deras omedelbara växtnäringseffekt är låg. För praktisk tillämpning behövs därför kombinationer med andra gödselmedel eller vidarebehandling som ökar fosfortillgängligheten.

Miljömässigt visar resultaten att termokemisk behandling inte generellt minskar klimatpåverkan jämfört med konventionell hantering, men att den eliminerar ammoniakförluster och minskar övergödningens risker. Pyrolys kan dessutom ge en netto klimatvinst på längre sikt genom kolinlagring, förutsatt att biokolet används på ett hållbart sätt.

Sammantaget kan termokemisk omvandling av kycklinggödsel utgöra ett realistiskt och hållbart komplement till befintlig gödselhantering, särskilt på gårdar med hög energiförbrukning eller begränsad spridningsareal. För att realisera denna potential krävs dock fortsatt utveckling av teknik för kväveåtervinning, samt tydligare regler och ekonomiska styrmedel som möjliggör användning av aska och biokol som certifierade gödselprodukter.

## **6. Relevans och rekommendationer**

Resultaten från projektet visar att termokemisk behandling av kycklinggödsel kan bidra till att stärka hållbarheten inom svensk fjäderfäproduktion genom att minska beroendet av fossila bränslen, minska lagringsförluster och skapa nya vägar för återföring av växtnäring. För att dessa möjligheter ska realiseras krävs dock tekniska, ekonomiska och regulatoriska åtgärder.

### **6.1 Relevans för lantbruket**

Förbränning av kycklinggödsel i befintliga biobränslepannor är redan idag ett realistiskt alternativ för gårdar med högt värmebehov. Tekniken möjliggör lokal energiåtervinning, reducerar transportbehovet av gödsel och kan ge ekonomiska besparingar. Pyrolys har längre väg till kommersiell tillämpning men kan på sikt skapa mervärde genom biokolproduktion och bidra till kolinlagring samt förbättrad markhälsa.

Aska och biokol från processen kan användas som komplement till mineralgödsel, särskilt på gårdar med sura jordar eller fosforöverskott. För att öka nyttan krävs tydliga riktlinjer för dosering och kombination med andra gödselmedel, samt fältförsök som följer effekter på markkemi, växtupptag och långsiktig fosforackumulering.

### **6.2 Förutsättningar för implementering**

För att tekniken ska kunna implementeras brett krävs:

- Utveckling av småskaliga, robusta system för förbränning och pyrolys med lägre investeringskostnad och anpassning till gårdsnivå.
- Kväveåtervinningsteknik integrerad i processen, till exempel genom rökgaskondensation eller ammoniakabsorption, för att öka den totala näringsåterföringen.
- Klarare regelverk som definierar hur aska och biokol får användas som gödselprodukter utan att klassas som avfall.
- Ekonomiska incitament eller klimatkompensation för kolinlagring i biokol, vilket kan öka lönsamheten för pyrolys.

Myndigheter och rådgivningsorganisationer kan bidra genom att utveckla standarder och rådgivningsmaterial för användning av termokemiska restprodukter i lantbruket, samt genom att underlätta tillståndsprocesser för småskaliga anläggningar.

### 6.3 Behov av fortsatt forskning

Projektet identifierar flera områden där vidare studier är motiverade:

- Fältförsök för att fastställa växttillgänglighet och långsiktig markpåverkan av aska och biokol.
- Mätningar av emissioner och energiutbyte under drift vid olika processförhållanden.
- Utveckling av integrerade processer för kväveretention och gasrening.
- Systemstudier som kopplar energianvändning, näringsflöden och ekonomi i olika regioner för att identifiera var tekniken är mest relevant.

Sammanfattningsvis bedöms resultaten ha direkt relevans för svenska fjäderfäproducenter, men också för andra gödselintensiva verksamheter inom animalieproduktionen. Termokemisk behandling kan på sikt utgöra en viktig komponent i ett mer cirkulärt, klimatneutralt jordbrukssystem – förutsatt att tekniken utvecklas i takt med nya regler, styrmedel och marknader för återvunna växtnäringsprodukter.

## 7. Referenser

- Billen, P., Costa, J., Van der Aa, L., Van Caneghem, J., Vandecasteele, E. (2015). Electricity from poultry manure: a cleaner alternative to direct land application. *J. Clean. Prod.* 96, 467–475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.016>
- Azzi, E.S., Karlton, E., Sundberg, C. (2021). Small-scale biochar production on Swedish farms: a model for estimating potential, variability, and environmental performance. *J. Clean. Prod.* 280, 124873. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124873>
- Cordeiro, C., Sindhøj, E. (2024). Situating the discourse of recycled nutrient fertilizers in circular economy principles for sustainable agriculture. *Front. Sustain.* 5:1465752. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1465752>
- European Commission. (2024). EU Fertilising Products Regulation and Soil Health Law – COM(2024) 75. Brussels: European Commission.
- Gao, N., Kamran, K., Quan, C., Williams, P.T. (2020). Thermochemical conversion of sewage sludge: a critical review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 79, 100843. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100843>
- Glaser, B., Lehr, V.I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9, 9338. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- Hussein, M. S., Burra, K.G., Amano, R.S.I, Gupta, A.K. (2017). Temperature and gasifying media effects on chicken manure pyrolysis and gasification. *Fuel*, 202, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.017>
- Jokubè, M., Hyrynen, M., Pihlainen, S., Hyytiäinen, K. (2025). Economic feasibility of biochar for carbon stock enhancement in Finnish agricultural soils. *Carbon Management*, 16. <https://doi.org/10.1080/17583004.2025.2465328>
- Yildiz, Z., Kaya, N., Topcu, Y., Uzun, H. (2019). Pyrolysis and optimization of chicken manure wastes in a fluidized bed reactor: CO<sub>2</sub> capture in activated biochars. *Process Saf. Environ. Prot.* 130, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.011>
- Zornoza, R., Moreno-Barriga, F., Acosta, J.A., Munoz, M.A., Faz, Á. (2016). Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. *Chemosphere*, 144, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.046>

**Result dissemination:**

<b>Scientific publications, published</b>	<i>Author(s), year, title, journal, Vol, No, pp. (doi/link if applicable)</i>
<b>Scientific publications, submitted</b>	<i>Author(s), title</i>
<b>Scientific publications, manuscript</b>	Erik Sindhøj, Vaida Dzemedzionaite, Stanley Zira, Andras Baky
	Thermochemical Conversion of Poultry Manure in Sweden: An Integrated Environmental and Economic Assessment
	Manuscript for submission to Journal of Cleaner Production
<b>Conference publications/ presentations</b>	Sindhøj E, Dzemedzionaite V, Zira S, Baky A. From Manure to Energy and Nutrients: Assessing Thermochemical Treatment Options under Swedish Farm Conditions
	Submitted abstract to ManuResource International Conference 2026.
	March 4-6, 2026. Wageningen, the Netherlands
<b>Other publications, media etc.</b>	<i>Title, year/date, place of publication (link if applicable)</i>
<b>Oral communication, to sector, students etc.</b>	Joint seminar with research group and students at the Institute of Fluid-Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Gdańsk, September, 2024.
	Vaida Dzemedzionaite
	Title of the seminar: Technology for combustion of Poultry Manure
<b>Student theses</b>	<i>Author/Student, co-authors/supervisors, year, title, type of thesis (doi/link if applicable)</i>
	<i>Patents, book chapters, reference group meetings etc.</i>

<b>Other including Patents</b>	