

Hur kan återvinning av näringsämnen i avloppsslam ske i praktiken?

Ett exempel från ett avslutat projekt "Nya energi- och resurseffektiva värdekedjor genom samförbränning av stråbränsle och slam" som pågick under 2022-25 inom Energimyndighetens Bio+ program

Marcus Öhman Luleå tekniska universitet, Nils Skoglund Umeå universitet



UMEÅ UNIVERSITET

LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

Projektdeltagare



- LTU – Energiteknik: Marcus Öhman, Elisabeth Wetterlund, Marzieh Bagheri, Ali Valizadeh
- UmU-TEC lab: Nils Skoglund, Jeenu Jegy, Anna Strandberg, Felix Johansson Carne, Marjan Bozaghian Bäckman
- LTU-Avfallsteknik: Jurate Kumpiene, Sarah Modupe Akindolie
- LTU-Rättsvetenskap: Maria Pettersson, Oskar Johansson
- RISE: Kent Davidsson, Susanne Paulrud, Esbjörn Pettersson
- GME AB: Bo Lundmark med driftpersonal
- CEWARO AB: Cecilia Wahlberg
- Skekraft: Emil Holmfridsson med driftpersonal
- VAKIN AB: Sara Boström
- NG Nordic (tidigare Fortum): Charlotte Nilsson

Varför samförbränna stråbränslen med slam (I)?

- Låg lönsamhet i stråbränslebaserade värdekedjor
- Outnyttjade överskottsytor och lantbruksbaserade restprodukter – en potential motsvarande 10-tals TWh
- Dagens slamhantering är kostsam – mottagningsavgifter upp mot flera tusentals SEK/ton TS diskuteras
- Brikettering/-valsning av låga halter blött slam i torra stråbränsle medger eventuellt en effektiv slamhantering
- 200 000 ton TS-avloppsslam produceras årligen i Sverige – räcker till att samla in en stor andel av stråpotentialen!

Varför samförbränna stråbränslen med slam (II)?

- Stråbränslens innehåll av grundämnen som K, Si och Cl kan ge upphov till svåra askrelaterade driftsproblem
- Sameldning med relativt låga inblandningsgrader av slam reducerar dessa problem p g a slammets innehåll av S och P – bättre balans i askan!



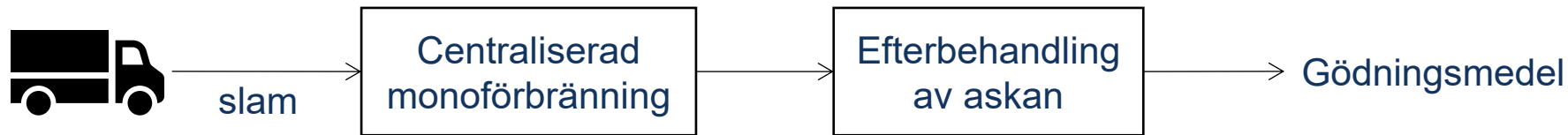
Varför samförbränna stråbränslen med slam (III)?

- Incitament för återvinning av P och K ur slam och åkerbränslen – produktion av växttillgänglig fosfat
- ”De-toxifiering” av slam
- Ersätta fossilbaserade produkter (mineral-P) med energi- och resurseffektiva biobaserade produkter
- Hållbar hantering av samhällets restprodukter och ökad flexibilitet i bränslekedjan



Hur återvinna näringsämnen i avloppsslam?

Ofta föreslagen metod: storskalig regional monoförbränning av avloppsslam i nya anläggningar



Alternativ metod som studerats i detta projekt: småskalig lokal samförbränning av avloppsslam och jordbruksrester i existerande pannor

Kaliumrik torrt strå



Fosforrik blött slam



- Effektiv fosforåtervinning
- Fosfor ej i växttillgänglig form – måste efterprocesseras
- Stor skala krävs
- Långa transporter av slam
- Betydande investeringar
- Dyr förbränning

- Kortare slamtransporter
- Mindre investeringar
- Enklare process
- Återvinning av kalium och fosfor och eventuellt direkt växttillgängligt!
- **Kostnad och tillgänglighet av jordbruksbiomassa**

Syfte

- Tidigare erfarenheter mestadels erhållna från lab-, bänk-, och pilotskala visar på en möjligheten att kombinera produktion av värme och el med framställning av växtnäring (K, P), samtidigt som samhällets restprodukter hanteras
- **Dags att verifiera detta i verkligheten och dessutom utvärdera kedjan utifrån ett lönsamhets-, miljömässigt och rättsligt perspektiv!**

Mål

- Bestämna inblandningsgrader av hygieniserat avloppsreningsslam i stråbränslen i briketter i syfte att direkt, in situ, i förbränningsprocessen bilda växttillgänglig fosfor och kalium.
- Genom fullskaleförsök i befintlig rosteranläggning bestämna förbränningsegenskaperna
- Bestämna möjligheten för att in-situ i förbränningsanläggningen bilda och återvinna växttillgängliga fosfater (näringämnen: K och P)
- Identifiera hinder och möjligheter för sameldning av stråbränslen och avloppsreningsslam och efterföljande spridning av den återvunna bottenaskan, ur ett (1) miljörättsligt, (2) teknokonomiskt, (3) miljökemiskt och (4) växthusgasutsläppsperspektiv.

Genomförande

AP 4 Utvärdering av bränslevärdekedjan (miljörätt, växthusgasprestanda, teknoekonomi)



AP 1 Förbehandling och sambrikettering av stråbränslen och avloppsrenings slam



AP 5 Kommunikation & affärsmodeller



AP 3 Utvärdering av produktkvalitet – ask-/kolbrikett

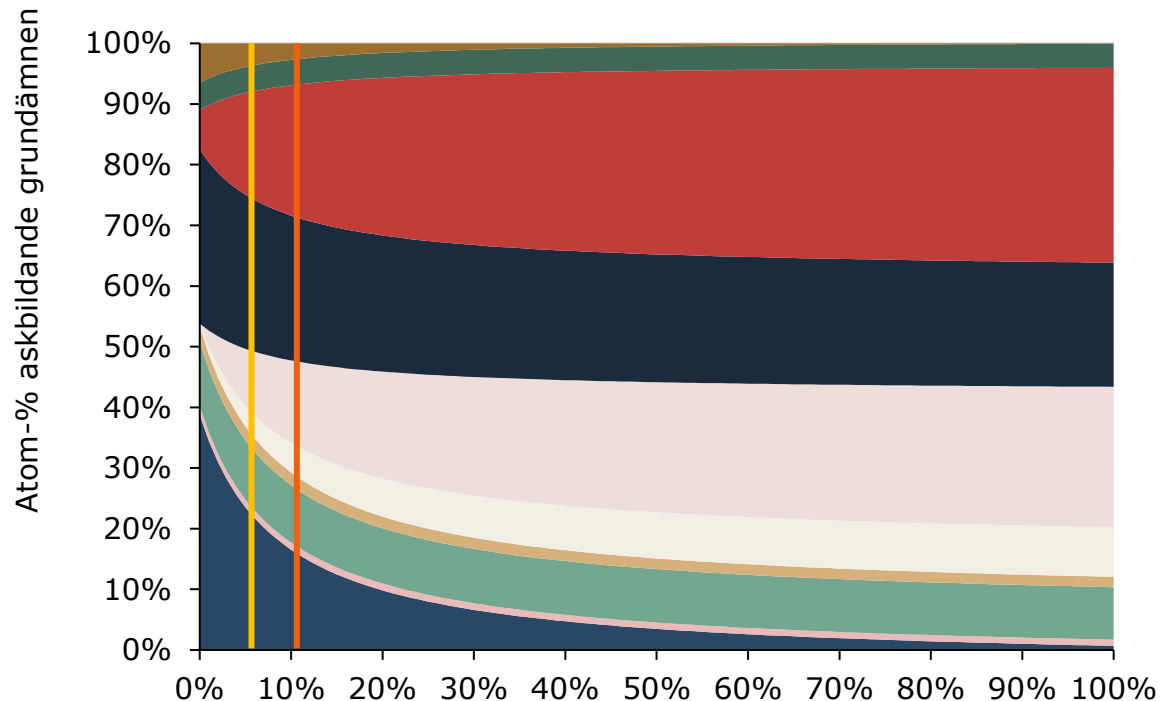


AP 2 Förbränningsförsök i rosteranläggning (10 MW)



Resultat från AP1 Förbehandling - identifiering av lämplig inblandning av slam i strå

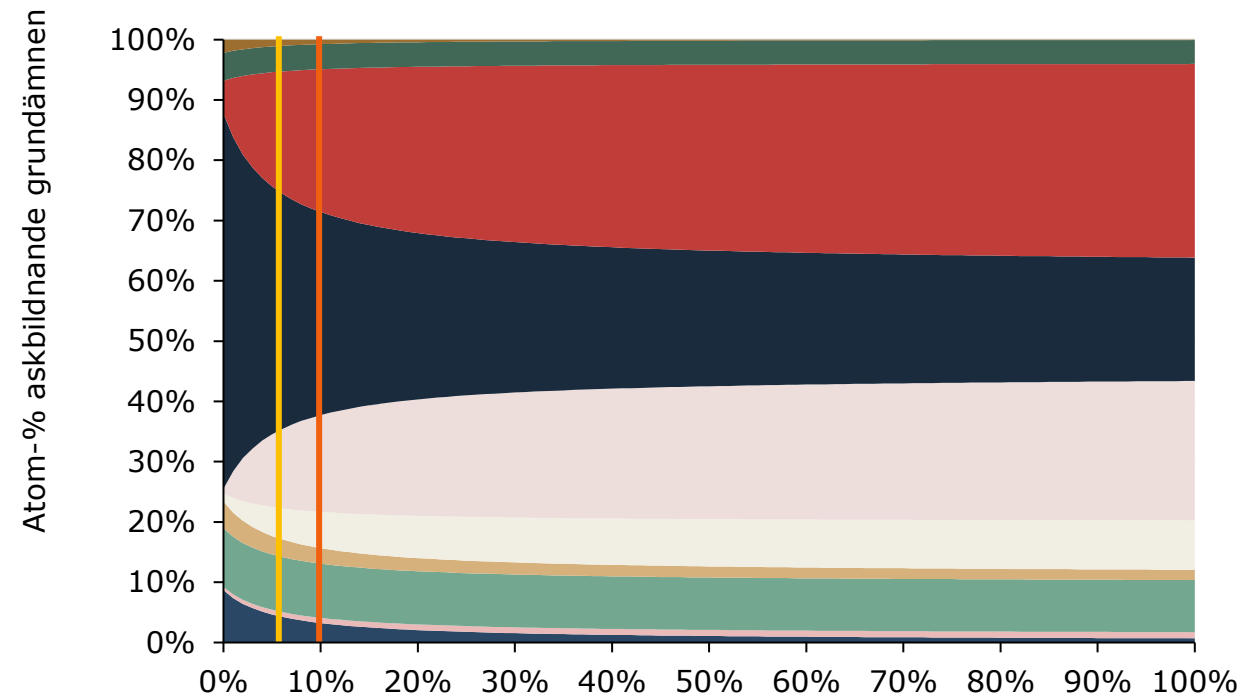
Kornhalm och slam leveranstillstånd



Andel slam i bränsleblandning

■ K ■ Na ■ Ca ■ Mg ■ Al ■ Fe ■ Si ■ P ■ S ■ Cl

Rörflen och slam leveranstillstånd



Andel slam i bränsleblandning

■ K ■ Na ■ Ca ■ Mg ■ Al ■ Fe ■ Si ■ P ■ S ■ Cl



UMEÅ
UNIVERSITET

Resultat från AP 1 Förbehandling



Genomförande AP 2 – Förbränning

- Varje brikettkvalitee (0, 5 och 10 vikts-% slam på TS basis i kornhalm/rörflen) förbrändes med en inblandning av fuktig flis om 75 vikts-% TS (ca 50% på energibasis) vid 2 MW under en dag
- Samma driftsinställningar som vid fliseldning
- Stabil drift erhöles utan behov av justeringar
- Rökgaserna analyserades m a p CO, O₂, NO_x, HCl, SO₂ och partiklar före stofffilter
- Beläggningsprovtagning med provsond (simulerad panntub)
- Efter varje försök samlades bottenaskan från fjärde rosterzonen som hållits stilla under försöket



Resultat från AP 2 – Förbränning

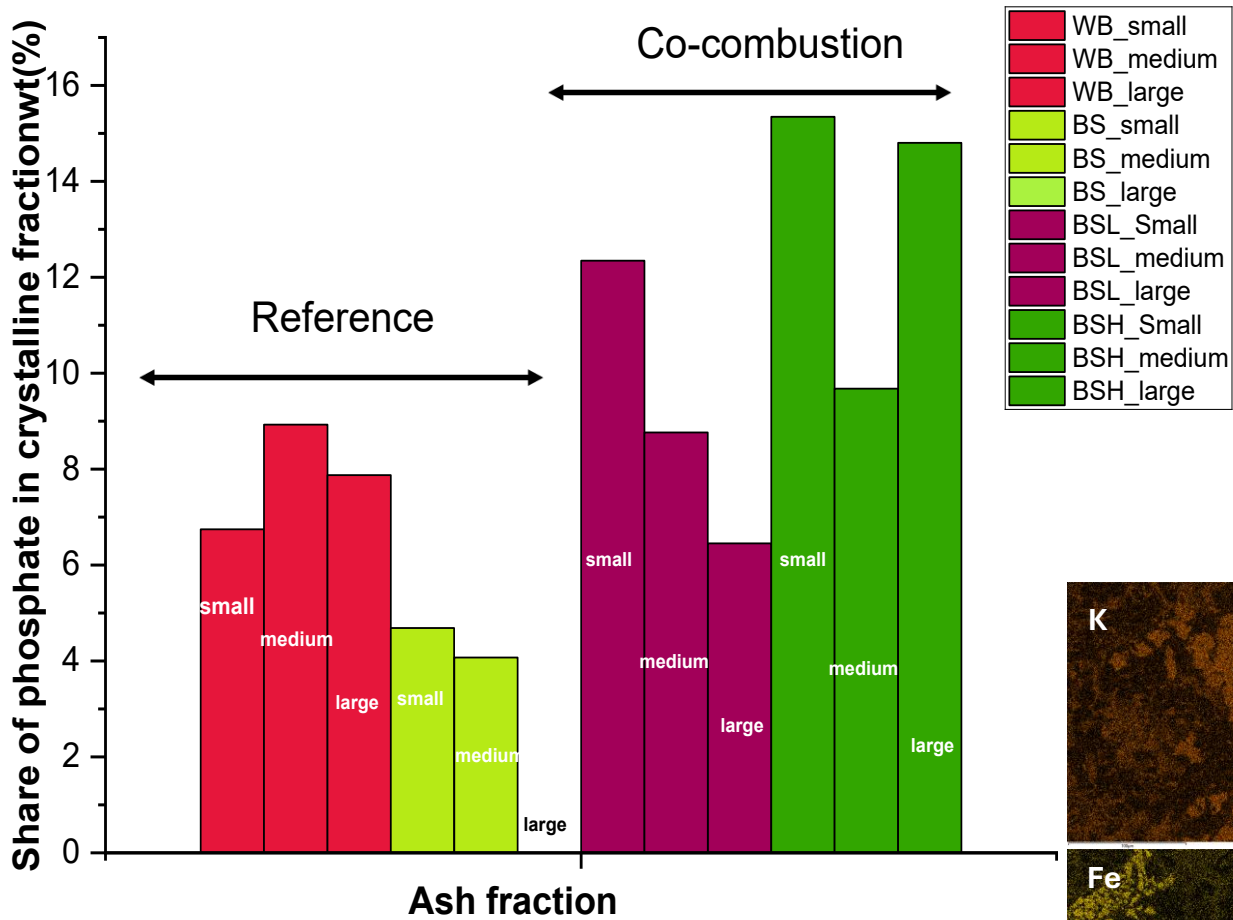
- NO_x och SO_x under gränsvärdet enligt förordningen om medelstora förbränningsanläggningar och avfallsförbränning. HCl något över vid inblandning av halm.
- Partikelkonc. i rågas mindre än 60 mg/Nm³. Dominerades av fina partiklar (< 1 µm).
- Reduktion av beläggingsbildning med upp till 40% vid inblandning av slam jämfört med förbränning av halm. Något lägre för rörflen. Högre S/Cl kvot i beläggningarna vid slaminblandning.
- Upp till 1,5 ggr mer bottenaska vid inblandning av slam
- Bottenaskfraktioner < 1,3 cm dominerar. Upp till 20–25 vikts-% stora askfraktioner (> 8,5 cm) i sameldningsfallen. Dessa slaggpartiklar kan brytas med handkraft och bedöms av driftpersonalen inte utgöra ett driftsproblem.
- Andel K och P i ingående bränsle som återfanns in bottenaskan > 90 vikts-%

Resultat från AP 3 – Utvärdering av produktkvalitet hos bottenaskan - Elementsammansättning hos bottenaskan

	Kornhalm	Kornhalm låg slaminblandning	Kornhalm hög slaminblandning	Rörflen	Rörflen låg slaminblandning	Rörflen hög slaminblandning
Askhalt (vikts-%)						
Askhalt	98,4	99,2	99,3	98,8	95,1	97,6
Elementanalys – askbildande huvudelement (vikts-% i bottenaska)						
K	10,21	6,47	6,34	10,16	6,75	6,45
Na	0,45	0,6	0,63	0,35	0,45	0,42
Ca	19,9	16,42	14,97	19,8	17,13	15,23
Mg	5,28	3,74	3,64	5,26	3,9	3,7
Al	1,39	2,11	2,19	1,38	2,2	2,23
Fe	1,64	10,01	10,7	1,63	10,44	10,89
Mn	2,23	1,38	1,28	2,22	1,44	1,3
Si	17,58	16,54	18,41	17,51	17,25	18,73
P	2,41	3,1	3,39	2,41	3,24	3,45
S	0,44	0,11	0,17	0,17	0,18	0,17
Cl	*	*	*	*	0,01	*
Elementanalys – spårelement (mg/kg bottenaska)						
As	13,4	3,32	5,66	13,4	3,46	5,76
Cd	2,99	0,59	1,19	2,98	0,61	1,21
Cr	1047	540	975	1043	563	992
Cu	151	126	129	151	131	131
Hg	*	*	*	*	*	*
Pb	10,8	5,67	14	10,7	5,91	14,2
Zn	665	342	359	662	357	365

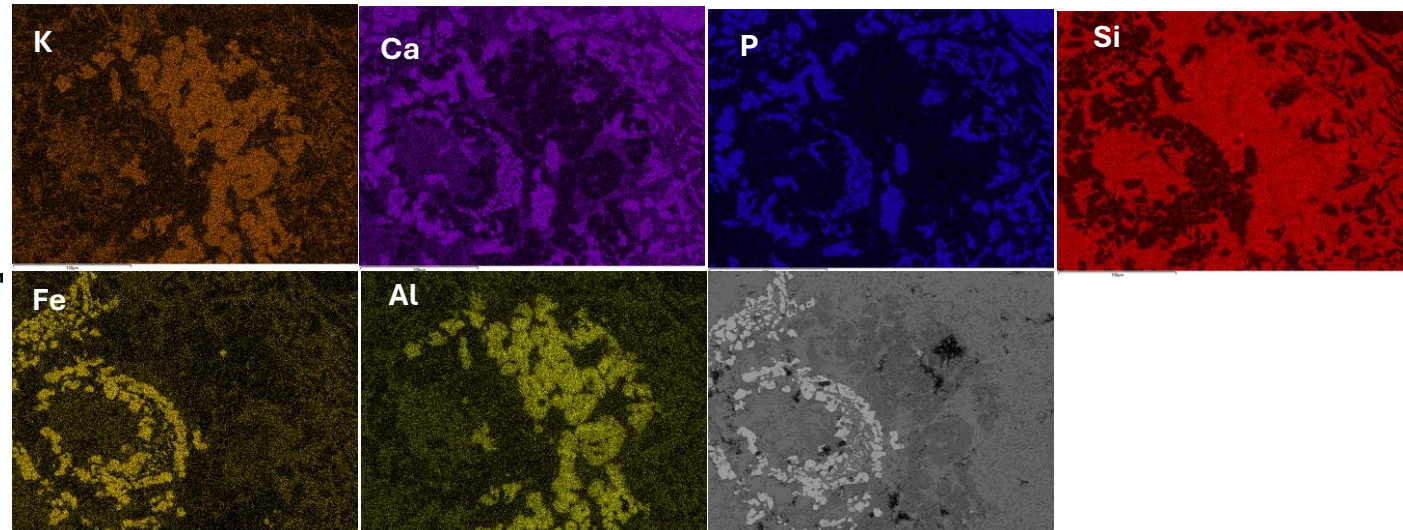
- Uppfyller kraven enligt EUR-LEX 2019/1009 för att klassificeras som oorganiskt gödningsmedel m a p huvudkomponenter (P, K, Ca, Mg och S)
- Behöver kompletteras med en kvävekälla (på samma sätt som trippelsuperfosfat)
- Avseende reglerade föroreningar överstiger endast Cr (förorening från rosterstavarna)
- PFAS under detektionsgränsen

Var och i vilken form finns fosfor?

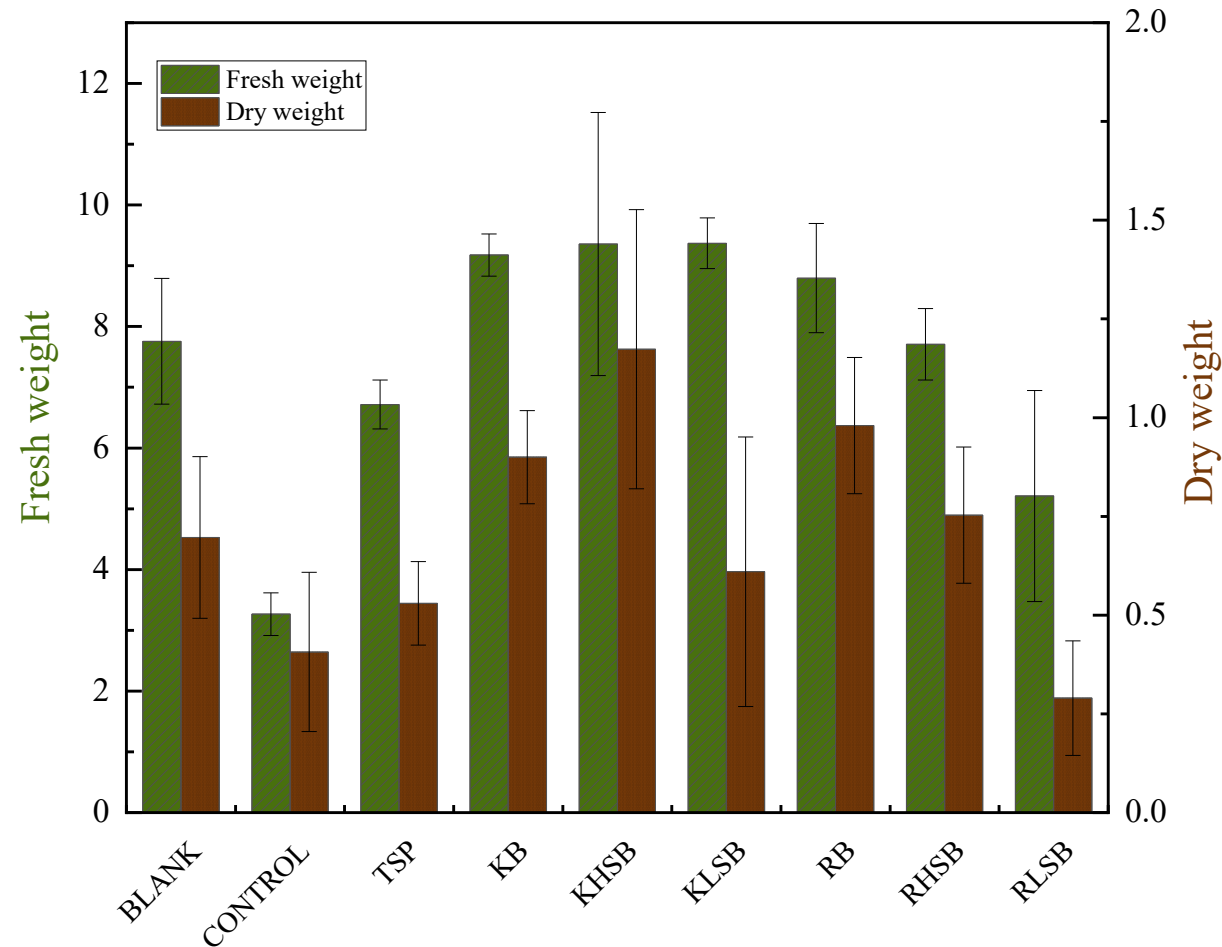


WB 100% träflis
 BS Kornhalm
 BSL Kornhalm låg slam
 BSH Kornhalm hög slam

- Andelen fosfor är högre i kristallint innehåll än i hela materialet
- Ca-Mg-K fosfater av whitlockite-typ dominerar – bränsledesignen lyckades
- Tydlig separation av silikater och fosfater i askan
- Kan påverka val av vilken storleksfraktion som föredras i praktiken



Resultat från tillväxtförsök (gram) med bönor i kruka (30 dagar)



Blank= ogödslad
Control= med kvävegödsel
TSP= trippelsuperfosfat

KB= Kornhalm
KHSB= Korhalm hög slaminblandning
KLSB= Kornhalm låg slaminblandning

RB= Rörflen
RHSB= Rörflen hög slaminblandning
RLSB= Rörflen låg slaminblandning

Resultat från AP 4: Utvärdering av bränslevärdekedjan teknoekonomiskt

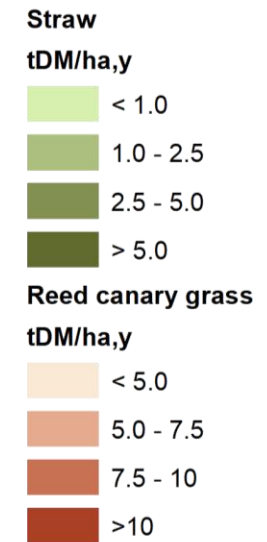
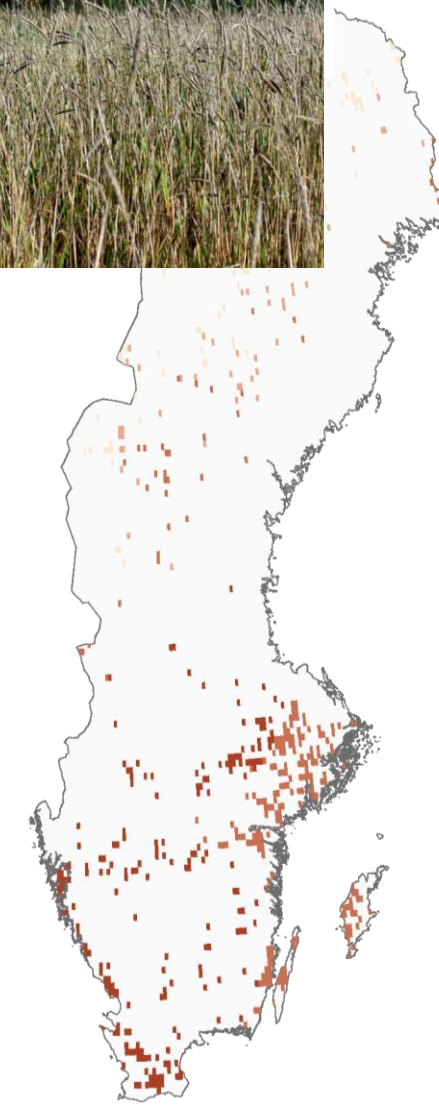
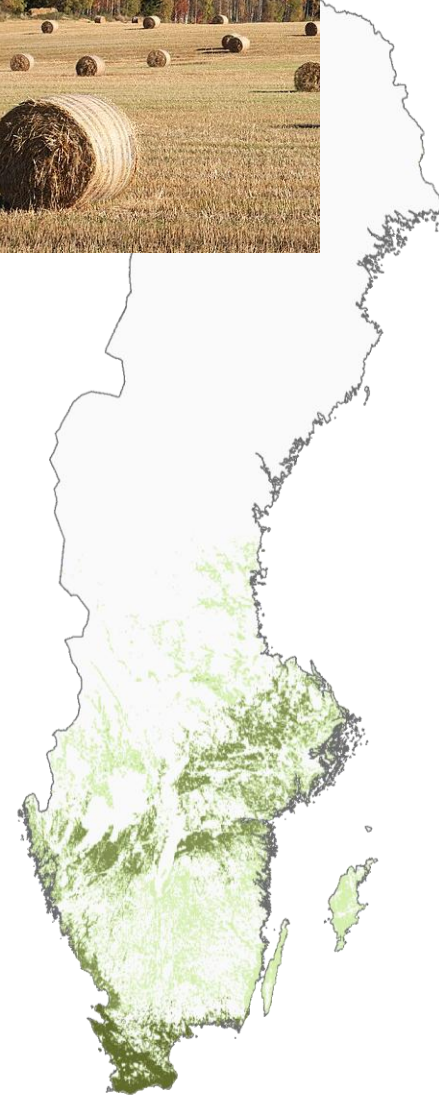
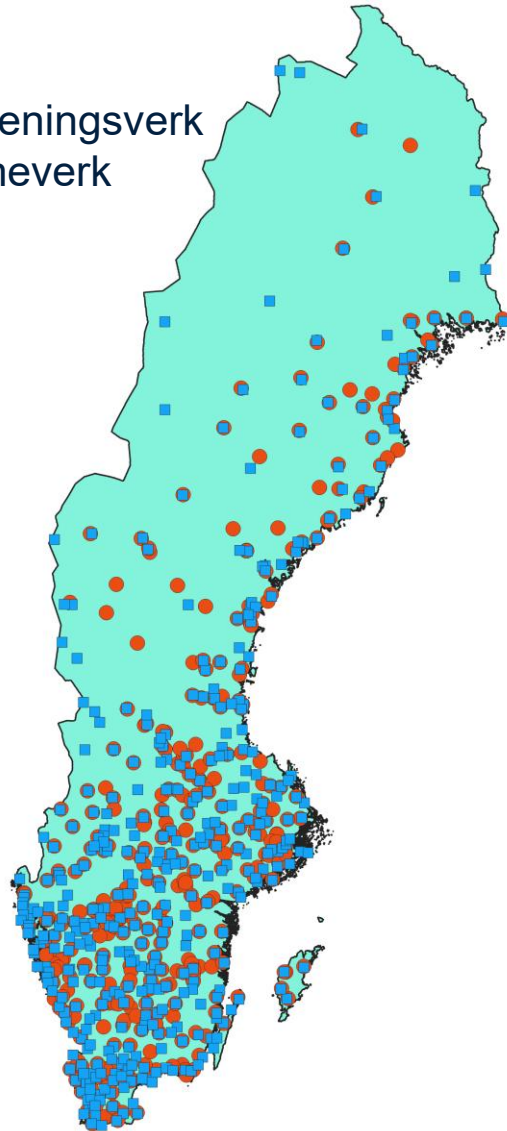
- Frågeställning

- Hur ser möjligheterna att få lönsamhet i samförbränning av avloppsslam och jordbruksrester ut för några av nyckelaktörerna i systemet/kedjan?
- Vilka är de främsta ekonomiska drivkrafterna respektive hindren?



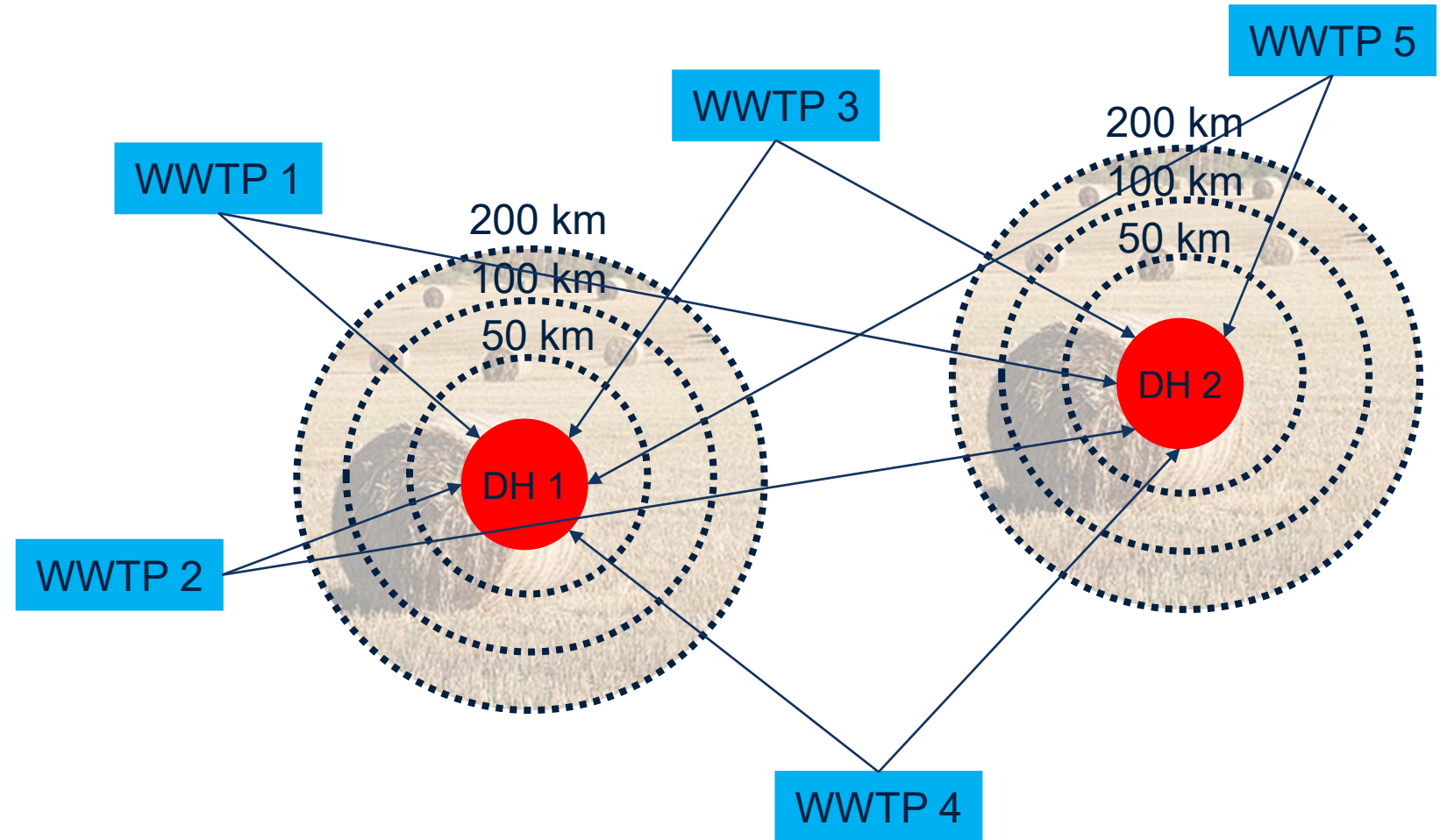
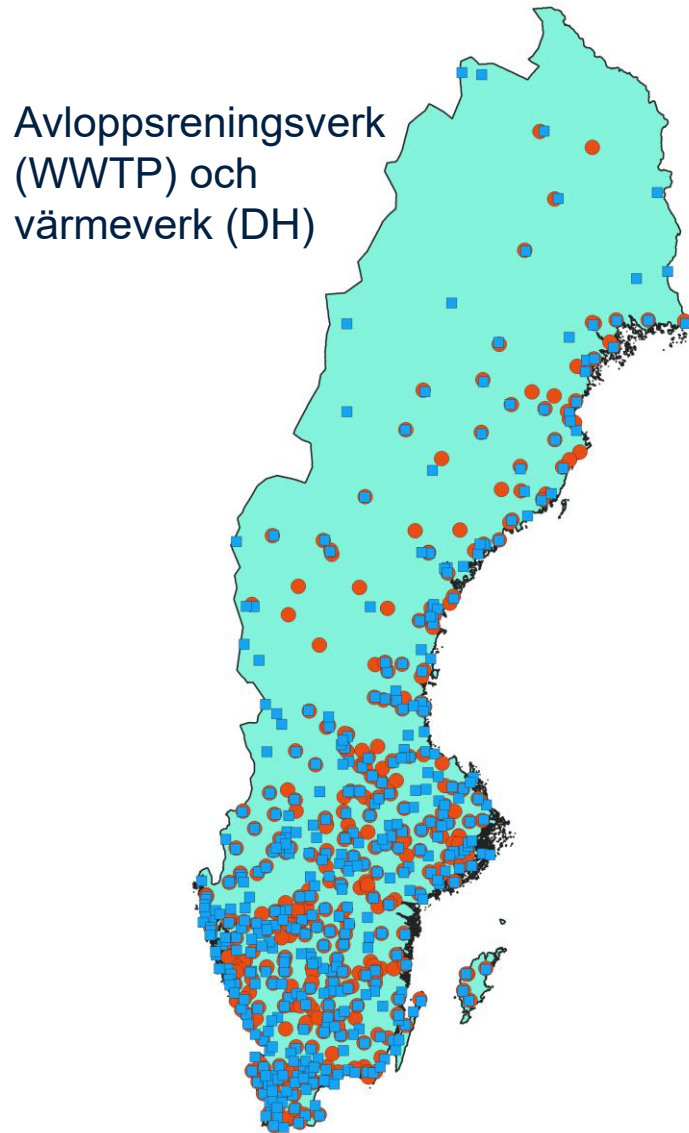
Jordbruksbiomassa

Avloppsreningsverk
och värmeverk



Data från: Einarsson & Persson (2017). PLoS One 12, 1–23.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171001>

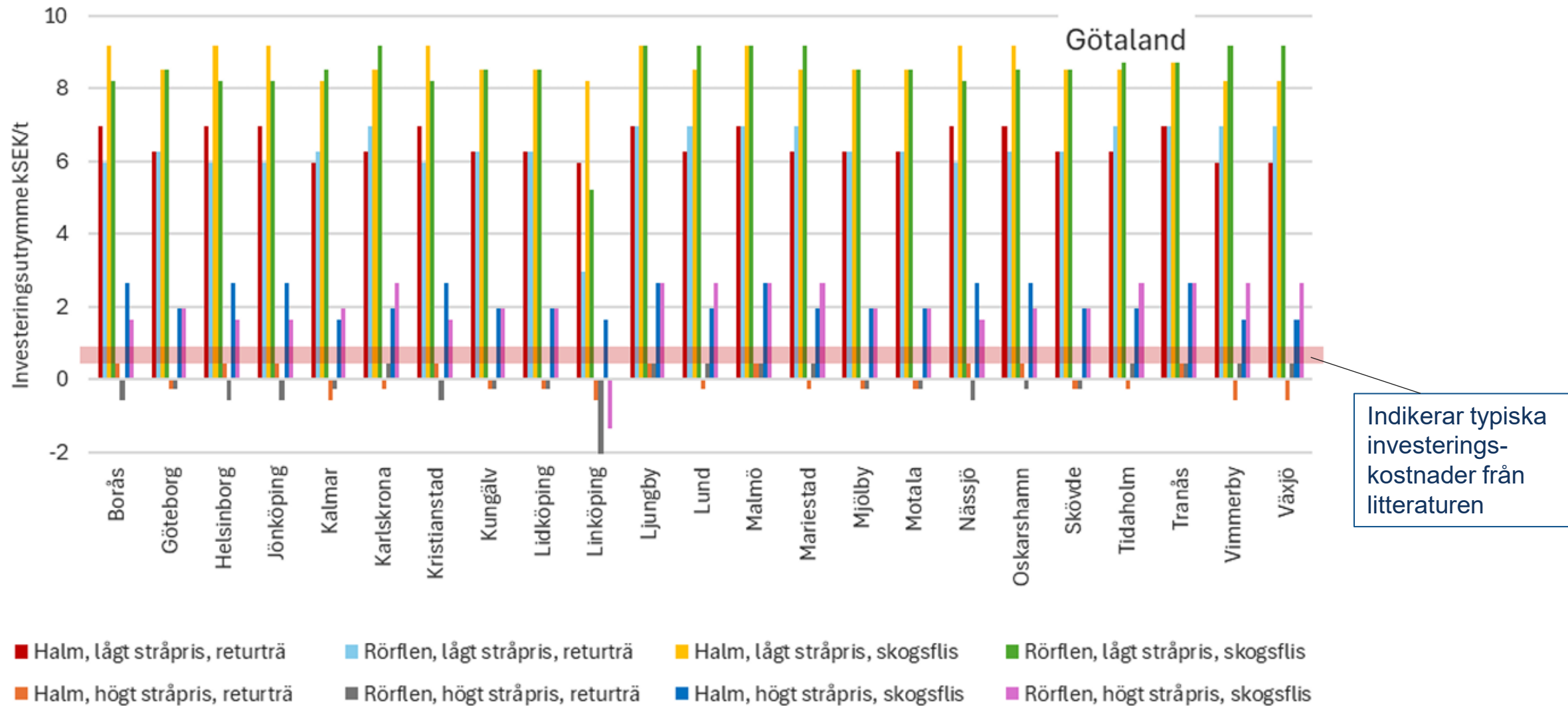
Data från: Iordan et al. (2023). Environ. Impact Assess. Rev. 98.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106942>



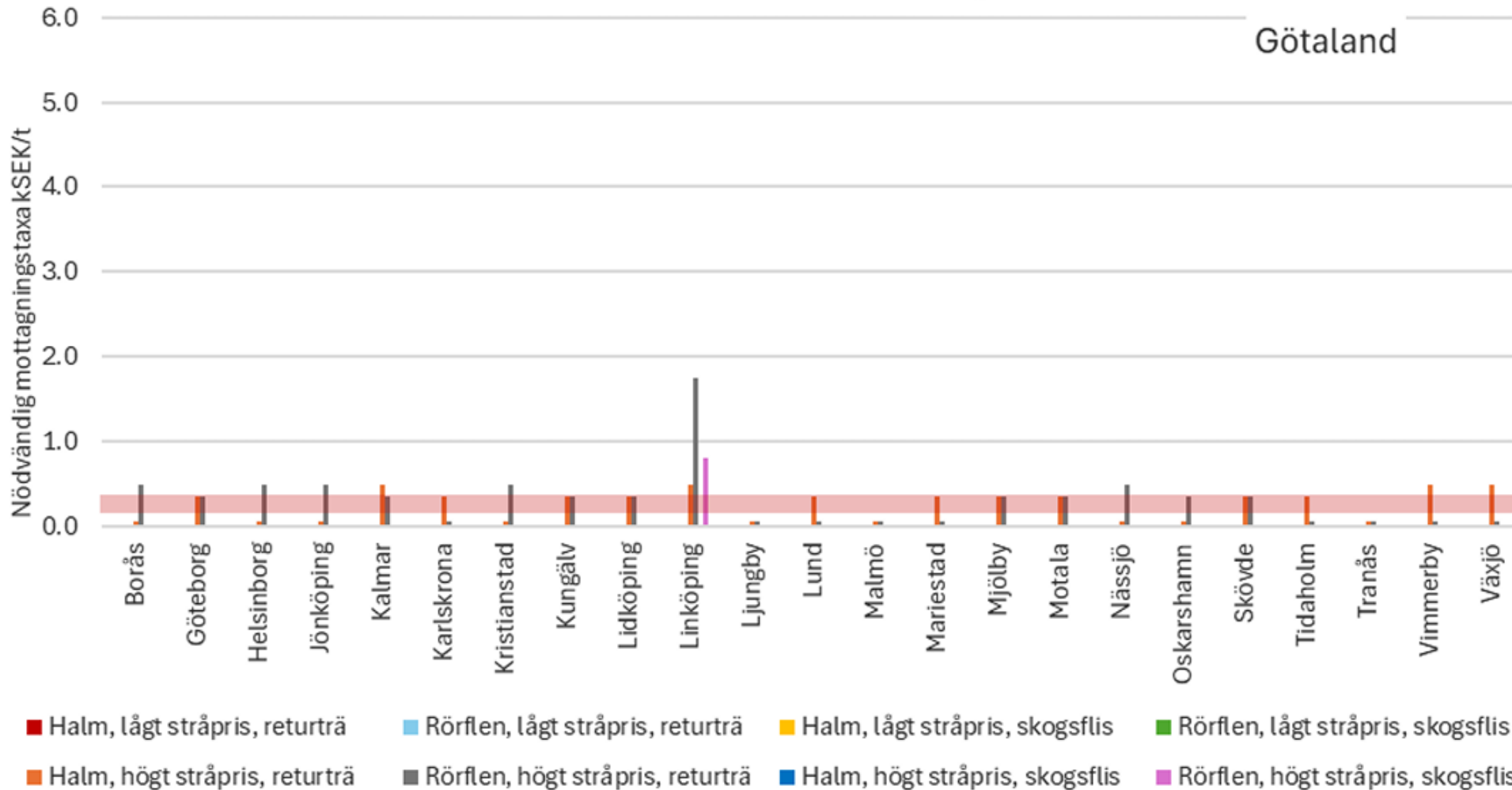
Några antaganden

- Bränsleblandning:
 - 10% slam, 90% stråbränsle (på torr massbasis) – ingen torkning krävs
 - Bränslet mals/hackas och briketteras/valsas före förbränning
- Förbränningsanläggningar:
 - Kan utnyttjas utan kostsam uppgradering av rökgasrening
 - Minst två veckors drift på bränslemixen
 - 90% av K och P från bränslet återfinns i bottenaskan
- Producerad fosfor- och kaliumrik bottenaska:
 - Kan användas direkt som gödningsmedel
 - Kan säljas till priser motsvarande de för mineralgödsel
- Ekonomiska antaganden:
 - Två olika priser för stråbränslen baserat på litteraturen (320 resp. 1500 SEK/t TS)
 - Två olika priser för ersatta trädbränslen (returträ 290 SEK/MWh; skogsflis 366 SEK/MWh – OBS! 2022 priser)
 - Reningsverken kompenserar värmeverken för behandling av slammet, genom en mottagningsavgift (grundvärde 250 SEK/t avvattnat slam, 25% TS)

Resulteraende specifikt investeringsutrymme i kSEK per årlig produktions kapacitet (t/år, fuktigt bränsle) för studerade pannor i Götaland

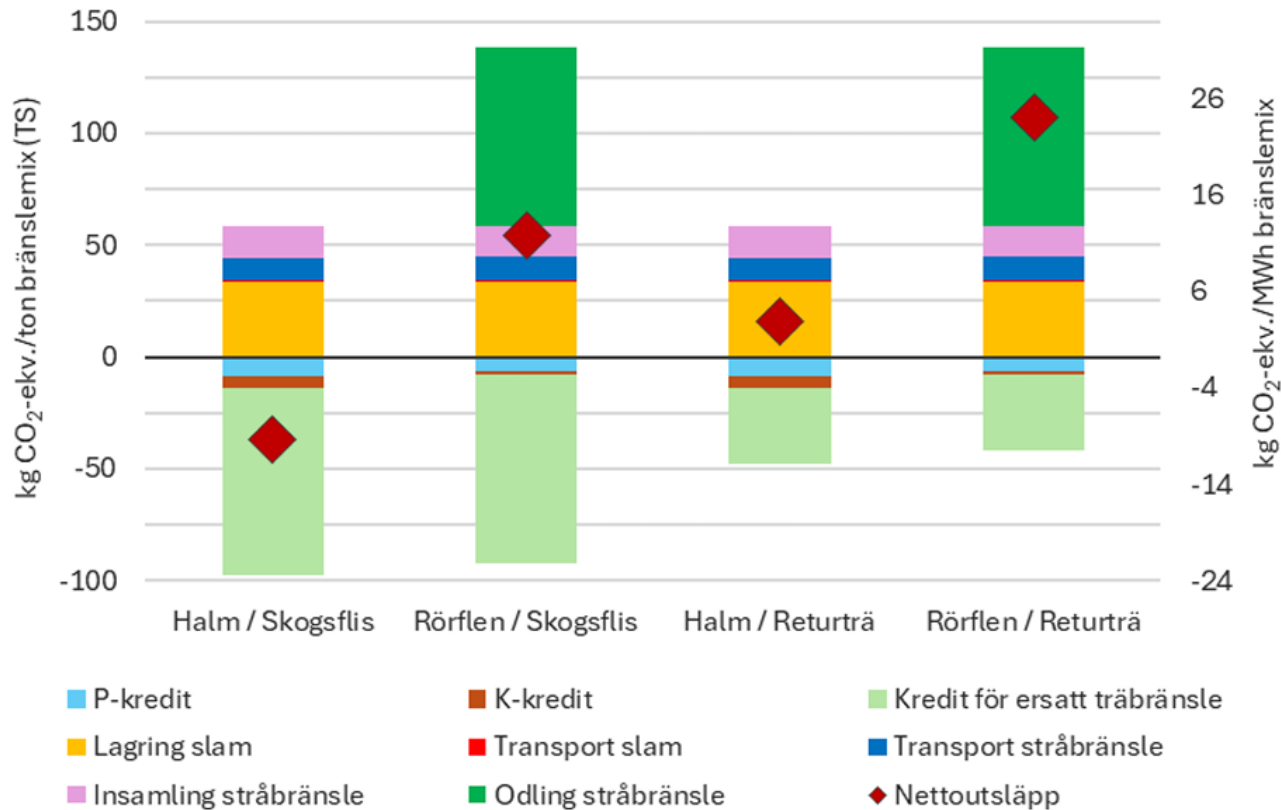


Resulteraende nödvändig mottagningstaxa för avloppsslam för att nå positivt investeringsutrymme i kSEK per ton slam (avvattnat slam, 25% TS), för studerade pannor i Götaland



Indikerar antagen mottagningstaxa i denna studie.

Resultat från AP 4: Utvärdering av bränslevärdekedjan - växthusgasutsläppsmässigt



	Utsläpps-faktor	Enhet
Odling av halm	0	kg CO ₂ -ek/ton TS
Odling av rörflen	89	kg CO ₂ -ek/ton TS
Insamling och hantering av stråbränslen	13	kg CO ₂ -ek/ton TS
Mellanlagring av slam (30 dagar)	334	kg CO ₂ -ek/ton TS
Lastbiltransporter av slam och stråbränsle	0,125	kg CO ₂ -ek/ton-km
Kredit för ersatt träbränsle (skogsflis)	20,5	kg CO ₂ -ek/MWh
Kredit för ersatt träbränsle (RT-flis)	8,2	kg CO ₂ -ek/MWh
P-kredit (trippelsuperfosfat, TSP)	1,66	kg CO ₂ -ek/kg P
K-kredit (KCl/MOP)	0,60	kg CO ₂ -ek/kg K

Slutsatser - tekniska resultat från förbehandling och förbränningsförsök

- Det är tekniskt möjligt att blanda in 5–10 % slam (på torr basis) i halm och rörfen och få fungerande briketter.
- Förbränningen fungerade stabilt i en vanlig panna (10 MW rostertyp).
- Inga driftproblem uppstod under testerna vid inblandning i (fuktig) träflis om 50 % på energibasis.
- Utsläpp av exempelvis kväveoxider och svaveloxider låg inom gällande gränsvärden.
- Signifikant reduktion (upp till 40%) av korttidsbeläggningar på provsond vid inblandning av slam.
- 90 % av fosfor och kalium hamnar i bottenaskan efter förbränning.

Slutsatser – näringsämnen i bottenaskan och miljöaspekter

- Bottenaskan innehåller tillräckligt höga halter näringsämnen för att kunna användas som gödsel enligt EU-regler.
- I växthusförsök med bönor gav askan ofta bättre tillväxt än traditionell mineralgödsel (trippelsuperfosfat). Effekten var särskilt tydlig när en större andel slam användes i bränslet (10 vikts-% på TS basis).
- PFAS, högfluorerade ämnen som är svårnedbrytbara i miljön, kunde inte påvisas.
- Kromhalter var ibland förhöjda, troligen på grund av slitage från pannans metalledar, inte från slammet.

Slutsatser – ekonomi och regelverk

- Regelverket förbjuder inte metoden/bränslekedjan, men det finns praktiska oklarheter som kan göra det svårare att införa den.
- Ekonomiskt sett är systemet mest fördelaktigt i södra Sverige, där halm är mer lättillgängligt. I norra Sverige kan långa transporter minska lönsamheten. Odling av rörflen lokalt skulle kunna förbättra situationen i norr.
- För pannor som idag eldas med dyrt bränsle (skogsflis) blir samförbränning extra gynnsam, vilket gör att ett stråbränslepris på över 1500 kr/t TS i många fall är hanterbart vid en mottagningskostnad i storleksordningen 250 kr/t avvattnat slam (vid 25 vikts-% torrhalt).
- För vissa särskilt gynnsamma fall, med god tillgång i närområdet på stråbränsle till lågt pris, kan mottagningskostnaden pressas ned ytterligare, vilket gör samförbränningen mindre beroende av högt marknadspris för bottenaskan.

Slutsatser – övergripande och förslag till fortsatta studier

- Samförbränning av strå och avloppsslam i befintliga anläggningar kan vara en resurseffektiv och konkurrenskraftig lösning för lokal/regional slamhantering och energianvändning.
- Samförbränning kan vara lika billig som eller billigare än andra slambehandlingar med fosforåtervinning, men beror på tillgången till kostnadseffektiva stråbränslen.
- Ett större demonstrationsprojekt behövs för att utvärdera hela kedjan i större skala inför implementering.
 - I ett sådant fall behövs en dialog med tillståndsgivande myndigheter, eftersom tydliga riktlinjer för samförbränning saknas i dag.
 - Projektet bör även testa förenklad bränslehantering (valsning utan torkning), vilket kan ge billigare briketter, lägre bäddtemperaturer och därmed eventuellt lägre Cr-halt i bottenaska.





För mer info och tillgång till projektets slutrapport:
[nya-energi-och-resurseffektiva-vardekedjor-genom-samforbranning-av-strabranslen-och-slam](#)