



Syraslam – en miljöutmaning

Jämförelse av gasutsläpp från biologisk och termisk behandlingsmetod

Axel Zakrisson

Examensarbete/Självständigt arbete • 15 hp

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Institutionen för mark och miljö

Biologi-och miljövetenskap

Uppsala 2025



Syraslam – en miljöutmaning

Jämförelse av gasutsläpp från biologisk och termisk behandlingsmetod

Acid Tar – An Environmental Challenge

Comparing Gas Emissions from Biological and Thermal Treatment Methods

Axel Zakrisson

Handledare:	Martyn Futter, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö
Examinator:	Brian Huser, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö

Omfattning:	15 hp
Nivå och fördjupning:	Grundnivå, G2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i Miljövetenskap
Kurskod:	EX0896
Program/utbildning:	Biologi- och miljövetenskap
Kursansvarig inst.:	Institutionen för mark och miljö
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2025
Nyckelord:	Syraslam, Mycoremediering, Klimatpåverkan

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för mark och miljö

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker och jämför klimatpåverkan från två behandlingskedjor för hantering av syraslam – ett farligt industriavfall som kännetecknas av högt innehåll av kol och svavelsyra. De två scenarier som analyseras är: A) biologisk behandling genom mycoremediering in situ med efterföljande pyrolys, och B) transport av kalkstabiliserat slam till och förbränning i högttemperaturanläggning (ex situ). Syftet är att kvantitativt jämföra utsläpp av växthusgaser uttryckt i koldioxidekvivalenter (CO₂e) samt att belysa skillnader i potentiella utsläpp av andra miljöfarliga ämnen.

Beräkningarna bygger på antaget behandlat slamflöde om 50 000 ton och utgår från antagande om kolinnehåll, transportavstånd, energianvändning vid pyrolys och emissionsfaktorer för både el och bränslen. Resultaten visar att scenario A genererar 33 722 ton CO₂e, vilket är 50% lägre än scenario B som uppgår till 67 267 ton CO₂e. Skillnaden beror främst på möjligheten att behandla slammet på plats (in situ), samt att en del av kolet från slammet binds som biokol istället för att förbrännas.

Utöver klimatpåverkan analyseras även skillnader i utsläpp av andra ämnen såsom svaveldioxid, PAH och BTEX. Förbränningen i scenario B innebär högre risk för spridning av dessa ämnen, medan scenario A minimerar eller omintetgör utsläpp av flyktiga och toxiska föroreningar genom biologisk nedbrytning samt pyrolys.

Sammantaget visar studien att mycoremediering kombinerat med pyrolysen kan vara ett mer klimat- och miljömässigt hållbart alternativ för hantering av syraslam än konventionell förbränning. Resultaten kan bidra till vidare forskning och diskussion om alternativa behandlingsmetoder för kolrikt farligt avfall.

Abstract

This thesis compares the climate impact of two treatment chains for acid tar, a hazardous industrial waste rich in organic carbon and sulfuric acid. Scenario A involves biological treatment via mycoremediation in situ followed by pyrolysis, while scenario B consists of long-distance transport of the lime- stabilized tar, and high temperature incineration. The objective is to quantify greenhouse gas emissions in carbon dioxide equivalents (CO₂e) and to highlight differences in the emissions profiles of other pollutants.

Assuming a sludge volume of 50 000 tonnes, the analysis incorporates parameters such as carbon content, transport distances, electricity use for pyrolysis, and emission factors for energy sources. Scenario A results in 33 722 tonnes CO₂e – 50% less than scenario B, which emits 67 267 tonnes. This reduction is primarily due to local treatment and carbon retention in the biochar.

While scenario B entails higher risks of emissions such as sulfur dioxide, PAHs and BTEX, scenario A limits or prevents the release of such substances through biological degradation and oxygen free pyrolysis.

The findings suggest that combining mycoremediation with pyrolysis may offer a more climate- and environmentally sustainable strategy for managing carbon rich hazardous waste.

1. Innehållsförteckning

1.	Innehållsförteckning	5
2.	Inledning	7
2.1	Mål och syfte	8
2.2	Definitioner av centrala begrepp	9
3.	Bakgrund.....	11
3.1	Ursprung och historisk kontext	11
3.2	Kemiska och fysiska egenskaper	11
3.3	Historiska hanteringsmetoder och miljökonsekvenser	12
3.4	Fallstudie: Knipgropen i Sverige	13
3.5	Saneringsutmaningar	13
3.6	Behovet av hållbara behandlingsstrategier	14
4.	Alternativa behandlingskedjor.....	16
4.1	Scenario A: In situ mycoremediering.....	16
4.2	Lufttorka biomassa	17
4.3	Pyrolys av biomassa	17
4.4	Biokol som slutprodukt	18
4.4.1	Alternativ slutprodukt: Svampfilter	19
4.4.2	Alternativ återvinna tungmetaller.....	20
4.5	Scenario B: transport av kalkstabiliserat slam.....	20
4.6	Tillsatt träflis för struktur och energi	21
4.7	Slamförbränning och emissioner	21
5.	Metod	23
5.1	Systemgränser och avgränsningar	23
5.2	Antaganden och beräkningsförutsättningar.....	24
5.2.1	Beräkning träflis.....	25
5.3	Datakällor och emissionsfaktorer	26
5.4	Beräkningsgång scenario A	27
5.5	Beräkningsgång scenario B	27
6.	Resultat	29
7.	Känslighetsanalys	36
7.1	Resultat känslighetsanalys	36
7.2	Diskussion av känslighetsanalys	38
8.	Diskussion.....	40
9.	Referenser	43

2. Inledning

Den petrokemiska industrins utveckling under 1900-talet möjliggjorde storskalig produktion av raffinerade oljeprodukter, men lämnade också efter sig miljöfarliga restprodukter, varav syraslam är en av de mest problematiska (Milne et al. 1986). Syraslam, ett farligt avfall från svavelsyrabehandling av petroleum, kännetecknas av lågt pH-värde, hög viskositet och toxiska ämnen som polycykliska aromatiska kolväten (PAH) och tungmetaller, vilket har orsakat omfattande miljöskador, särskilt genom stor deponering och otillräcklig remediering (Tita et al., 2023). Traditionella behandlingsmetoder, såsom högtemperaturförbränning, dominerar hanteringen men är problematiska ur ett hållbarhetsperspektiv på grund av höga utsläpp av växthusgaser (CO₂) och försurande ämnen som svaveloxider (SO₂) (Marmsjö & Hoffman, 2014).

Detta examensarbete adresserar utmaningen att identifiera en behandlingsmetod för syraslam som minimerar klimatpåverkan och miljöfarliga utsläpp jämfört med konventionell förbränning. Genom att jämföra två behandlingskedjor – biologisk behandling via mycoremediering följt av pyrolys, och transport av kalkstabiliserat slam och förbränning – kvantifieras utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO₂e) och bedöms emissioner av miljöfarliga ämnen som SO₂, PAH och BTEX (bensen, toluen, etylbensen, xylén). Studien bidrar till globala hållbarhetsmål, såsom Parisavtalets mål om nettonollutsläpp och EU:s direktiv om cirkulär ekonomi, genom att utforska alternativ som minskar utsläpp och omvandlar avfall till resurser, såsom biokol.

Behandlingen av syraslam aktualiserar flera av de grundläggande hänsynsreglerna i miljöbalken (1998:808), särskilt kravet på användandet av bästa möjliga teknik (2 kap. 3§). Enligt denna lag ska verksamhetsutövare välja den teknik som är mest lämpig ur miljösynpunkt, med hänsyn till vad som är tekniskt möjligt och ekonomiskt rimligt. Valet av behandlingsmetod får därmed betydande juridiska konsekvenser, inte minst när olika alternativ innebär stora skillnader i klimatpåverkan och utsläpp av miljöfarliga ämnen.

Tidigare forskning har fokuserat på tekniska lösningar för syraslam, såsom förbränning (Marmsjö och Hoffman, 2014) och kemisk stabilisering (Xu, 2007), men biologiska metoder som mycoremediering har fått mindre uppmärksamhet, trots lovande resultat för nedbrytning av petroleumkolväten (Gupta & Pathak, 2020). Mycoremediering, där svampar bryter ned komplexa organiska föreningar med extracellulära enzymer, kan kombineras med pyrolys för att stabilisera kol i biokol, vilket erbjuder långsiktig kolinlagring (Akhtar et al.,

2020). Denna studie fyller en kunskapslucka genom att systematiskt jämföra klimatpåverkan och miljöeffekter av dessa metoder, vilket är avgörande i en tid där nationella klimatstrategier och miljölagstiftning, såsom Miljöbalkens krav på bästa möjliga teknik (MB 2 kap. 3§), efterfrågar resurseffektiva och klimatsmarta lösningar.

Frågor som hur en svampbaserad metod står sig mot förbränning, vilka utsläpp som genereras och hur stor besparingen i växthusgasutsläpp kan bli är centrala. Studien syftar till att ge ett kunskapsunderlag för beslutsfattare inom avfallshantering och oljeindustrin, samt bidra till utvecklingen av hållbara strategier för hantering av kolrika, farliga avfall

2.1 Mål och syfte

Målet med detta arbete är att kvantitativt jämföra klimatpåverkan från två behandlingskedjor för syraslam: (1) in situ mycoremediering följt av pyrolys till biokol, och (2) internationell transport av kalkstabiliserat syraslam och högtemperaturförbränning (ex situ). Jämförelsen fokuserar på utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO_2e), men belyser också kvalitativt miljöfarliga emissioner, specifikt svaveldioxid (SO_2), polycykliska aromatiska kolväten (PAH), BTEX (bensen, toluen, etylbensen, xylene) och tungmetaller, för att bedöma behandlingskedjornas miljö- och hälsopåverkan.

Syftet är att fastställa vilken behandlingsmetod som är mest fördelaktig ur ett klimat- och miljöperspektiv vid industriell hantering av syraslam från oljeraffinering. Genom en litteraturbaserad analys kartläggs miljöpåverkan från dessa behandlingskedjor, med särskilt fokus på hållbara alternativ som stödjer cirkulär ekonomi, hållbarhet och kolinlagring. Studien använder ett livscykelperspektiv för att strukturera analysen, där systemgränser omfattar direkta utsläpp från behandling, transport och biprodukter.

Resultaten avser att bidra med ett vetenskapligt underlag för tillämpningen av Miljöbalkens krav på bästa möjliga teknik (MB 2 kap. 3§) och ge beslutsfattare inom avfallshantering, oljeindustri och miljösanering bedömningsunderlag för beslut. Genom att belysa potentialen för minskade utsläpp och miljöskador kan arbetet skapa en grund för framtida diskussion om strategier för hållbar hantering av detta farliga avfall.

2.2 Definitioner av centrala begrepp

TOC (Total Organic Carbon)

Total mängd organiskt kol i ett material. I detta arbete uttrycks TOC i ton kol och används som grund för att beräkna potentiella koldioxidutsläpp vid biologisk samt termisk nedbrytning.

CUE (Carbon Use Efficiency)

Andelen av det organiska kolet (TOC) som inte mineraliseras till koldioxid under mycoremedieringen, utan binds i svampens biomassa. Ett högre CUE-värde innebär att mer kol överförs till biomassa och därmed kan bli biokol i nästa steg.

Biokolutbyte

Andelen av den torra biomassan som omvandlas till fast biokol vid pyrolys. Resten av biomassan förloras som gasformiga eller flytande produkter (t.ex bioolja och pyrolysgas).

Kolretention

Den andel av det kol som fanns i biomassan som bevaras i färdig biokol efter pyrolys. Beräknas som andelen kol i biokolen jämfört med det ursprungliga kolinnehållet i biomassan.

Kolsänka

Ett nettoupptag av koldioxid från atmosfären som lagras under en längre tid. I detta arbete betraktas kol som långsiktigt bundet om det ingår i biokol.

In situ-behandling

En behandling som sker direkt på plats där föroreningen finns, utan att materialet transporteras bort.

Ex situ-behandling

En behandling som sker efter att det förorenade materialet transporterats till en annan plats.

CO₂e (koldioxidekvivalenter)

Ett mått på klimatpåverkan där olika växthusgaser omräknas till motsvarande mängd koldioxid baserat på deras globala uppvärmningspotential (GWP). I detta arbete används CO₂e för att uttrycka alla utsläpp relaterade till de två behandlingsscenarierna.

3. Bakgrund

Syraslam, eller *acid tar*, är en av de mest problematiska restprodukterna från 1900-talets petrokemiska industri. Detta farliga avfall, som uppstår vid svavelsyrabehandling av petroleumprodukter som bensin, smörjoljor och högraffinerade oljor, har orsakat betydande miljöskador världen över (Leonard et al., 2010). Dess kemiska komplexitet, toxicitet och historiskt otillräckliga hanteringsmetoder gör det till en fortsatt utmaning för miljösanering. Denna bakgrundssektion beskriver syraslams ursprung, kemiska och fysiska egenskaper, historiska hanteringsmetoder, miljökonsekvenser och de tekniska och ekonomiska utmaningar som präglar saneringsarbetet, samt belyser behovet av hållbara alternativ som kan minska klimatpåverkan och stödja en cirkulär ekonomi.

3.1 Ursprung och historisk kontext

Syraslam genererades i stor skala under 1900-talet som en biprodukt från svavelsyrabehandling, en process som användes för att rena petroleumprodukter från svavel- och kväveföroreningar (Frolov et al., 1985). Denna metod var central för produktionen av bensin, smörjoljor och så kallade *white oils* – högraffinerade oljor för medicinska och industriella ändamål – och användes flitigt från tidigt 1900-tal fram till 1980-talet, då katalytiska raffineringstekniker började ta över (Leonard et al., 2010). Under denna period producerades stora mängder syraslam, ofta utan tillräckliga strategier för säker hantering eller bortskaffande.

Deponering skedde vanligen i otäta laguner, nedlagda grustag eller gamla gruvor, där avfallet dumpades utan skyddsbarriärer (Tita et al., 2023). I Storbritannien uppskattas cirka 150 sådana laguner finnas, med volymer mellan 3 000 och 60 000 m³ per lagun, medan större deponier i Centraleuropa kan innehålla upp till 150 000 ton syraslam (Xu, 2007; SUBRIM, 2008). Bristen på kontroll och dokumentation vid historisk deponering av syraslam har gjort syraslam-laguner till ett globalt miljöproblem. Dessa deponier, som är utbredda i industrialiserade länder, fortsätter att påverka mark, vatten och hälsa långt efter att de togs ut bruk (Karuss et al., 2021).

3.2 Kemiska och fysiska egenskaper

Syraslam är en mörk, trögflytande vätska med en karaktäristisk stickande lukt och ett pH-värde ofta under 2, vilket gör den starkt korrosiv (SUBRIM, 2008). Dess sammansättning är mycket variabel och beror på råmaterial och produktionsprocess, men typiska komponenter inkluderar 10-70 % svavelsyra, 15-70 % organiska kolväten (inkluderat PAH, BTEX och andra flyktiga organiska ämnen - VOC), 2-40 % vatten samt, i vissa fall, tungmetaller som bly, kadmium och krom (Milene et al., 1986; Radovanović, 2024). Varianter från återaffinering av smörjoljor kan även innehålla upp

till 10 % blekjord, en restprodukt från reningsprocessen som ytterligare komplicerar hanteringen (Xu, 2007).

Enligt Forlov et al. (1985) innehåller lagrat syraslam fortfarande omkring 30% svavelsyra (oorganiskt) och 30 - 60 % sulfonerade organiska föreningar, vilket innebär att även lagrat slam kan ha en hög total svavelhalt. Både den fria syran och de organiska svavelföreningarna är temiskt instabila och oxideras vid höga temperaturer, vilket leder till betydande utsläpp av svaveloxider vid förbränning och kräver avancerad rökgasrening (Frolov et al., 1985; Tita et al., 2023).

Heterogeniteten hos slammet är en av de största utmaningarna vid behandling. Syraslam är temperaturkänsligt - vid höga temperaturer blir det mer flytande, medan det vid låga temperaturer kan stelna, för att sedan bli mobilt igen vid uppvärmning eller tryck (Milne et al., 1986). Dess normalt sett låga biologiska nedbrytbarhet och kemiska instabilitet gör det svårt att behandla med standardiserade metoder. Dessutom innehåller syraslam ofta toxiska ämnen som PAH, BTEX (bensen, toluen, etylbensen, xylen), andra flyktiga organiska föreningar (VOC) och tungmetaller, vilka kan spridas till mark och grundvatten över lång tid (Radovanović, 2024). Dessa egenskaper gör syraslam till ett långsiktigt miljöhot, särskilt i deponier där det kan behålla sina farliga egenskaper i decennier.

3.3 Historiska hanteringsmetoder och miljökonsekvenser

Under stora delar av 1900-talet hanterades syraslam genom deponering i öppna bassänger eller andra håligheter i marken, såsom grustag eller gruvor, utan tätning eller skyddsbarriärer (Tita et al., 2023). I många fall blandades syraslam med andra avfallstyper, såsom kemikalietunnor, aska, sand eller slagg, vilket ökade de miljömässiga riskerna (Xu, 2007). Denna praxis ledde till omfattande förorening av mark och grundvatten, särskilt eftersom slammet är rörligt och kan migrera genom markfissurer, porösa jordlager eller längs rötter (Tita et al., 2023). Vid exponering för luft avger syraslam svaveldioxid (SO_2), en frätande gas som bidrar till försurning och hälsorisker, medan fysisk störning kan orsaka läckage av organiska föroreningar och tungmetaller (Xu, 2007).

Ett exempel på dessa problem är saneringsprojektet i Cheminiz, Tyskland, där cirka 120 000 m³ syraslam deponerats i öppna laguner. Över årtionden ledde väderexponering och kemisk instabilitet till förorening av mark och grundvatten, samt betydande SO_2 -utsläpp vid fysisk påverkan (Grub, 2004). För att hantera emissionerna krävdes slutna behandlingssystem och omfattande neutralisering, vilket illustrerar de tekniska svårigheterna med traditionella saneringsmetoder.

3.4 Fallstudie: Knipgropen i Sverige

I Sverige exemplifieras syraslammets miljöpåverkan av Knipgropen, en deponi på fastigheten Kniphammaren 1:3 i Jönköpings kommun. Mellan 1956 och 1972 deponerades cirka 10 000 m³ industriavfall, inklusive syraslam, i en tidigare grustäkt av Skandinaviska Oljecentralen AB (Fransson, 2009). Med tiden identifierades spridning av föroreningar till omgivande mark och grundvatten, vilket påverkade Hällstorpsån, som avvattnas till Tabergsån och vidare till Vättern. Uppskattningsvis läckte 30 - 40 kg kolväteföreningar och mindre mängder tungmetaller årligen från platsen.

Saneringsåtgärder genomfördes mellan 2000 och 2001, där cirka 877 ton ytligt beläget syraslam grävdes upp och transporterades till SAKAB (nu Fortum Waste Solutions) för högtemperaturförbränning (Fransson, 2009). På grund av slammets höga svavelhalt och reaktivitet begränsades förbränningskapaciteten till cirka ett ton per vecka, vilket förlängde processen avsevärt. För att minska fortsatt spridning tätades området för att reducera grundvattenbildning med minst 90 %, och ytterligare åtgärder som inhägnad och kontroll av utströmningsområden vidtogs. Knipgropen illustrerar både de långsiktiga miljöriskerna med syraslam och de praktiska utmaningarna med traditionella behandlingsmetoder som förbränning, vilka är tidskrävande och emissionsintensiva.

3.5 Saneringsutmaningar

Sanering av syraslamdeponier är tekniskt komplex och ekonomiskt krävande. Materialets kemiska reaktivitet innebär att mekanisk störning, såsom vid exkavering, kan utlösa betydande utsläpp av SO₂. Erfarenheter från Cheminix visar att sådana emissioner kan öka femfaldigt vid grävning jämfört med orörda förhållanden (Grub, 2004). För att minimera riskerna används ofta kalciumoxid (kalk) för att neutralisera slammet och höja dess pH-värde, vilket gör det mindre korrosivt och lättare att hantera (Xu, 2007). Denna process är dock exoterm och kan, om den inte kontrolleras, generera värme som orsakar ytterligare SO₂-utsläpp eller volatilisering av organiska föroreningar.

Syraslammets rörlighet förvärrar problemen. Det kan tränga genom markfissurer eller porösa jordlager, vilket riskerar sekundär förorening av grundvatten och ytvatten (Tita et al., 2023). Detta kräver avancerade, platsanpassade lösningar, såsom slutna hanteringssystem, vilket ökar komplexiteten och kostnaderna. Ekonomiskt sett är sanering en betydande börda – en lagun i Lettland, av jämförbar storlek (Incukalns, ca 30 000 m³), kostade över 31 miljoner euro att sanera, vilket illustrerar hur föroreningsgraden och tekniska kraven för syraslam kan driva upp kostnaderna kraftigt (World Bank, 2021; Karuss et al., 2021). I låginkomstländer, där resurser för miljösanering är begränsade, förblir många deponier oadresserade, vilket förlänger miljöskadorna.

Utöver de tekniska och logistiska utmaningarna vid hantering av syraslam, spelar även kostnaderna för sanering en avgörande roll i valet av behandlingsmetod. Enligt Magnus Ivarsson (VD på MycoMine) ligger behandlingskostnaderna för förbränning av syraslam i storleksordningen 7000–10000 kr per ton syraslam. Detta inkluderar kostnader för stabilisering, transport och själva förbränningsprocessen.

I kontrast uppges kostnaden för behandling med mycoremediering följt av pyrolys vara avsevärt lägre, omkring 2000 kr per ton syraslam. Denna kostnad omfattar hela behandlingskedjan från mycelbehandling till biokolsproduktion och innebär in situ-behandling, vilket eliminerar behovet av – och riskerna med – långväga transporter.

Kostnadsskillnaden på upp till 8000 kr per ton utgör därför en potentiell avgörande faktor i val av behandlingsstrategi, särskilt i storskaliga projekt där det rör sig om tiotusentals ton avfall. Detta återkopplas även till betydelsen vid tillämpning av bästa möjlig teknik (BAT) enligt miljöbalkens allmänna hänsynsregler. Vad som utgör BAT avgörs inte enbart utifrån teknisk prestanda, utan även med hänsyn till vad som är ekonomisk rimligt för verksamhetsutövaren. En väsentligt billigare behandling som samtidigt innebär minskad klimatpåverkan kan därmed väga tungt i bedömningen av vad som är skäligt att kräva av verksamhetsutövaren.

3.6 Behovet av hållbara behandlingsstrategier

Traditionella metoder som högtemperaturförbränning reducerar visserligen avfallets volym, men ger samtidigt upphov till betydande utsläpp av växthusgaser och andra föroreningar. Något som kan stå i konflikt med globala hållbarhetsmål och Parisavtalet och EU:s strävan om cirkulär ekonomi.

Framsteg inom bioteknik, särskilt biologiska metoder som mycoremediering, erbjuder ett potentiellt alternativ. Genom att behandla syraslam på plats (in situ) kan mycoremediering minska behovet av riskfylld- och långväga transport, samtidigt som svamparnas enzymer bryter ned hälsofarliga organiska föroreningar och inkorporerar kolet i sin egen biomassa (Akhtar et al., 2020). Kombinationen med pyrolys, som omvandlar den resulterande biomassan till biokol, möjliggör långsiktig kolinlagring och reducerar klimatpåverkan (Akhtar et al., 2020). Dessa metoder stödjer en cirkulär ekonomi genom att omvandla avfall till en resurs, till skillnad från förbränning som genererar aska och betydande utsläpp till atmosfären.

Denna studie syftar till att utvärdera sådana innovativa strategier i jämförelse med traditionell förbränning, med fokus på deras klimatpåverkan. Genom att kvantifiera utsläpp av växthusgaser och andra miljöfarliga ämnen söker arbetet identifiera behandlingskedjor som balanserar miljönytta, klimatansvar och ekonomisk

genomförbarhet, och därigenom bidra till en mer hållbar hantering av syraslam och liknande kolrika avfall.

4. Alternativa behandlingskedjor

I detta arbete jämförs två alternativa hanteringsmetoder för syraslam med avseende på klimat och miljöpåverkan, uttryckt i koldioxidekvivalenter samt förekomst av andra hälsofarliga emissioner. Syftet är att undersöka vilken behandlingsstrategi som medför lägst klimatbelastning samt hälsorisker under antagna förhållanden. I scenario A studeras ett biologiskt alternativ där syraslam behandlas med mycoremediering på plats (in situ), det vill säga med hjälp av svampars nedbrytande enzymer, följt av pyrolys av den resulterande biomassan. Pyrolysen omvandlar det organiska materialet till biokol, vilket betraktas som en långsiktig form av kolinlagning. I scenario B antas istället att syraslammet transporteras från plats (ex situ) i Stockholm till en anläggning i Frankfurt för förbränning. Förbränningen resulterar i att slammet neutraliseras, men också i atmosfäriska utsläpp av både klimat- och miljöfarlig karaktär.

Jämförelsen mellan scenarierna fokuserar på klimatpåverkan från respektive processkedja, inklusive utsläpp från transporter, behandling och eventuella biprodukter. Studien bygger på schablonvärden, antaganden och uppgifter från litteratur, och utgör därmed en förenklad klimatjämförelse med fokus på kolflöden och utsläpp kopplade till behandlingsvalet.

4.1 Scenario A: In situ mycoremediering

Mycoremediering är en underkategori av bioremediering och innebär att användningen av svampar för att bryta ned, transformera eller stabilisera miljöföroreningar i exempelvis mark, vatten eller sediment. Den bygger på svampars unika biologiska egenskaper, framför allt deras förmåga att producera extracellulära enzymer med låg substratspecificitet samt att bilda ett förgrenat hyfnätverk med stor kontaktyta mot omgivningen (Akhtar et al., 2020). De enzymer som är centrala i mycoremediering är främst de så kallade ligninolytiska enzymerna, vilka evolutionärt är utvecklade för att bryta ned lignin i växtmaterial.

Dessa enzymer, såsom laccas, peroxidaser och manganperoxidaser, har visat sig kunna bryta ned en mängd stabila organiska föreningar som är strukturellt besläktade med lignin, däribland polycykliska aromatiska kolväten (PAH). Den enzymatiska nedbrytningen i kombination med svampens inkorporering av kol i sin egen biomassa leder till att föroreningarna omvandlas till koldioxid, vatten och ny biomassa, eller vattenlösliga biologiskt nedbrytbara metaboliter.

Mycoremediering har också relevans vid sanering av komplexa kontamineringskällor där både organiska och oorganiska föroreningar förekommer (Akhtar et al., 2020). Vissa svampgrupper har visat förmåga att tåla höga halter tungmetaller, samt binda dessa till cellväggskomponenter såsom polysackarider och metallbindande proteiner. Det innebär att mycoremediering kan möjliggöra både nedbrytning av organiska ämnen och immobilisering av tungmetaller vid behandling av förorenade slamfraktioner.

Mycoremediering har identifierats som en metod med stor framtida potential, inte minst på grund av dess kombination av ekologisk hållbarhet, låga energiåtgång och möjlighet att utnyttja tekniken in situ, vilket exkluderar långa transporter av miljöfarligt material (Akhtar et al., 2020). Svampbiomassan som bildas vid remedieringsprocessen kan vidareförädlas, till exempel genom pyrolys till biokol.

4.2 Lufttorka biomassa

Efter att mycoremedieringen genomförts används lufttorkning som metod för att reducera fukthalten i den uppodlade mycelbiomassan, och båda behandlingsstegen genomförs in situ (M.Ivarsson, personlig kommunikation, 2025). Syftet med lufttorkningen är dels att minska vikten och volymen på det behandlade materialet inför vidare hantering, dels att förbereda biomassan för pyrolys vid en separat anläggning.

Genom att sprida biomassan i tunna lager på ventilerade torkytor, ofta med hjälp av fläktar, kan fukthalten sänkas till cirka 10% (Zhang et al., 2021). Denna nivå är tillräcklig för att stoppa biologisk aktivitet och minska risken för mikrobiell tillväxt, samtidigt som materialet förbereds för vidare transport och pyrolys (Lehmann och Joseph, 2015; Bridgwater, 2012). Genom att undvika aktiv termisk torkning, hålls energianvändningen på en låg nivå, vilket gör torkningsprocessen till ett energieffektivt förbehandlingssteg som är särskilt fördelaktigt i storskaliga tillämpningar där energiåtgång ska begränsas om så möjligt. När tillräckligt låg fukthalt uppnåtts kan det torkade materialet transporteras till pyrolysanläggning.

4.3 Pyrolys av biomassa

Pyrolys är en termisk process där organiskt material upphettas i en syrefri eller syrereducerad miljö (Afshar och Mofatteh, 2024). Resultatet är en fast, kolrik

restprodukt som kallas biokol. I behandling av syraslam som först genomgått mycoremediering kan pyrolys användas för att stabilisera det kol som bundits i den svampbaserade biomassan. På så sätt omvandlas tillfälligt lagrat kol till en långlivad form med potential att fungera som kolsänka. Biokolets egenskaper påverkas främst av råmaterialets sammansättning och pyrolystemperaturen. Högre temperatur leder till ett lägre utbyte av biokol, men resulterar samtidigt i en produkt med högre kolinnehåll och större kemisk stabilitet. Det innebär att biokol som produceras vid exempelvis 500 C kan bestå i marken i hundratals till tusentals år, vilket är centralt för dess klimatnytta.

Utöver råmaterialets egenskaper påverkas pyrolysens klimatpåverkan också av vilket energislag som används för uppvärmningen. I eldrivna pyrolysanläggningar sker energiöverföringen elektriskt, och mängden el som krävs kan variera beroende på design och driftform. Elförbrukningen i scenario A baseras på data från Cobos-Torres et al. (2024), där elbehovet för pyrolys uppmättes till cirka 0,455 kWh per kg biomassa i en elektrisk reaktor driven av solceller (Cobos-Torres et al., 2024).

4.4 Biokol som slutprodukt

I scenario A är biokol det slutliga resultatet efter pyrolys av svampbiomassan. Den färdiga produkten kännetecknas av hög porositet, stor specifik yta och kemiskt stabil struktur, vilket gör den lämplig för både klimatrelaterade och agronomiska tillämpningar – särskilt som jordförbättringsmedel (Afshar och Mofatteh, 2024).

En av de viktigaste egenskaperna hos biokol är dess förmåga att lagra kol i marken under mycket lång tid. Tack vara sin motståndskraft mot mikrobiell nedbrytning kan biokolet bidra till att praktiskt permanent avlägsna koldioxid ur atmosfären. Afshar och Mofatteh (2024) uppskattar att varje ton biokol som tillförs marken motsvarar en reduktion på 2,0 - 2,6 ton CO₂e. IPCC (2022) pekar också ut biokol som en av de negativa utsläppsteknikerna med störst global potential, särskilt när den kombineras med hållbar markanvändning och jordbruksstrategier.

Utöver sin klimatnytta har biokol visat sig kunna förbättra markens både fysikaliska och kemiska egenskaper på flera sätt. Biokolets höga katjonbyteskapacitet (CEC) ökar jordens förmåga att binda och hålla kvar näringsämnen, vilket leder till bättre näringstillgänglighet för växter (Haider et al., 2017). Den porösa strukturen och stora specifika ytan hos biokol bidrar också till att förbättra jordens vattenhållande förmåga, vilket är särskilt fördelaktigt i torra

klimat eller under perioder med begränsad nederbörd (Kinney et al., 2012). Genom att minska näringsläckage och förbättra retentionen av vattenlösliga näringsämnen kan biokol dessutom bidra till en mer långsiktig bördighet i jorden, vilket minskar behovet av konstgödsel och därmed risken för övergödning av vattendrag (Laird et al., 2010). Detta innebär att biokol inte enbart fungerar som ett verktyg för kolinlagring utan också som en betydande resurs för förbättrad jordhälsa och hållbar livsmedelsproduktion.

Som pyrolysisprodukt från restbiomassa – i detta fall svampmaterial som vuxit på behandlat syraslam – bidrar biokolet till en cirkulär bioekonomi där ett tidigare problematiskt avfall omvandlas till en stabil och användbar resurs. På så vis representerar biokolet inte endast slutprodukten i behandlingskedjan utan också ett sätt att aktivt skapa miljö- och klimatnytta, i kontrast till exempelvis förbränningsaska som klassas som avfall.

4.4.1 Alternativ slutprodukt: Svampfilter

Torkad mycelbiomassa har visat sig vara mycket effektiv för att avlägsna tungmetaller från vatten. I en studie undersöktes hur torkade mycelmembran från släktet *Ganoderma* kunde användas för att ta bort blyjoner ur vattenlösningar (Parasnis et al., 2024). Resultaten visade att mer än 95 % av blyet kunde avlägsnas vid koncentrationer upp till 1000 ppm, och även vid högre koncentrationer, som 1500 ppm, var borttagningen över 60%. Den totala upptagningsförmågan uppmättes till cirka 826 milligram bly per gram mycel.

Upptaget sker genom att blyjonerna binder till kemiska grupper på mycelets yta, såsom karboxyl- och hydroxylgrupper. Dessa finns naturligt i cellväggen hos svampens hyfer och fungerar som aktiva bindningsställen. Genom att behandla mycelet med fosfatlösningar kunde forskare också öka borttagningen av bly.

Fosfaten gjorde att blyet omvandlades till fasta mineralformer som bildades direkt på mycelets yta. Detta gör blyet mindre lösligt och mindre tillgängligt för spridning i miljön (Parasnis et al., 2024).

Förutom tester i stillastående lösningar prövades även torkade mycelmembran i ett system med rinnande vatten. Där uppnåddes 85 - 90 % borttagning av bly vid de högsta testande halterna, vilket visar att tekniken fungerar även i praktiska tillämpningar (Parasnis et al., 2024).

Till skillnad från levande svampbiomassa behöver torkat mycel inte någon särskild miljö för att fungera, vilket förenklar både hantering och lagring. Det är också biologiskt nedbrytbart och enkelt att forma till strukturer som kan användas som filtermaterial (Jones et al., 2020; Haneef et al., 2017). Dessa egenskaper gör torkat mycel intressant som en del av en hållbar behandlingskedja, till exempel efter mycoremediering av syraslam, där det kan användas för att fånga upp kvarvarande tungmetaller innan biomassan går vidare till exempelvis pyrolys.

4.4.2 Alternativ återvinna tungmetaller

Vid behandling av syraslam som innehåller tungmetaller kan dessa oskadliggöras effektivt genom pyrolys av den svampbiomassa som uppodlats under mycoremedieringen. Under pyrolysen immobiliseras tungmetallerna i den fasta biokolfasen, ofta i form av stabila oxider, sulfider eller fosfater, vilket kraftigt minskar deras löslighet och miljörisk (Chai et al., 2022). Denna stabilisering gör att metallerna inte lätt kan läcka ut till omgivningen, vilket bidrar till en säkrare långtidsförvaring av föroreningarna. Förutom immobilisering erbjuder behandlingskedjan även möjlighet till återvinning av metallerna. Genom att utsätta den metallrika biokolen för kemisk lakning kan tungmetaller extraheras och återvinnas. Vid lakning används exempelvis syralösning som löser upp metallerna från biokolets matris, varefter de kan renas och återföras till industriellt bruk (Chai et al., 2022). Denna metod skapar möjlighet att omvandla en tidigare föroreningskälla till en sekundär råvarukälla, vilket stödjer cirkulära och resurseffektiva principer för avfallshantering.

På så vis kan pyrolysen av biomassan både minska miljöriskerna från syraslam och möjliggöra återanvändning av värdefulla metaller beroende på önskad behandlingsstrategi.

4.5 Scenario B: transport av kalkstabiliserat slam

Efter att syraslammet neutraliserats med cirka 20 viktprocent kalciumoxid blir materialet både kemiskt och fysikaliskt stabilare, vilket underlättar förberedelser inför transport (Xu, 2007). Den ökade stabiliteten är dock inte utan nackdelar. Tillsatsen av kalk innebär att slamvolymen och framförallt vikten ökar med motsvarande procentsats, vilket har direkt konsekvenser för transportens klimatpåverkan. Då varje transportfordon måste frakta en större totalmassa, utan att den faktiska mängden behandlingskrävande föroreningar i slammet förändras. Detta leder till ökade utsläpp av koldioxid per transporterad enhet material.

4.6 Tillsatt träflis för struktur och energi

För att möjliggöra effektiv förbränning av syraslam krävs ofta tillsats av externa bränslen (Marmsjö och Hoffman, 2014). Syraslam har generellt låg brännbarhet och hög fukthalt, vilket tillsammans leder till att materialet inte brinner effektivt på egen hand (Kijo-Kleczkowska et al., 2016). Vid industriell förbränning är det därför vanligt att komplettera med energirika material såsom kol, eldningsolja eller biomassa för att upprätthålla en stabil temperatur och säkerställa en fungerande förbränningsprocess (Marmsjö och Hoffman, 2014). En studerad och använd metod är att blanda in träflis, särskilt för slam med hög vattenhalt eller viskös konsistens (Skoglund et al., 2016). Detta fungerar i sammanhanget som ett stödbränsle med högt energiinnehåll och goda förbränningsegenskaper. Det torra fibrösa materialet ger syraslammet en mer porös struktur, vilket underlättar luftgenomströmning och förbättrar syretillförseln under förbränningen. Träflisen ökar på så sätt de heterogena slammets termiska egenskaper, vilket underlättar förbränningsprocessen.

4.7 Slamförbränning och emissioner

Vid förbränning av syraslam utsätts det för höga temperaturer, ofta i roterugnar eller fluidiserade bäddar, där det organiska innehållet bryts ned (Tita et al., 2023). Förbränningen leder till en betydande volymreduktion av slammet, men också till bildning av miljöfarliga utsläpp som kräver avancerad rökgasrening.

Förbränningen genererar stora mängder svaveldioxid, men även svaveltrioxid kan bildas i mindre mängder genom vidareoxidation av svaveldioxid. Dessa ämnen bildas när svavelsyra i slammet oxideras vid höga temperaturer, och är starkt försurande för både mark och vatten (SUBRIM, 2008; Tita et al., 2023).

Förbränningen leder även till utsläpp av flyktiga organiska ämnen (VOC) samt BTEX-föreningar (Xu, 2007). Dessa föreningar är cancerframkallande och förekommer särskilt syraslam från bensolraffinering. Utöver dessa toxiska ämnen kan även PAH föreningar frigöras med gasutsläppen. Dessa ämnen är mycket stabila, bioackumulerande och flera är klassificerade som starkt cancerframkallande (Xu, 2007).

Ett ytterligare problem är emission av tungmetaller i gasform under förbränningen. Slammet kan innehålla metaller som arsenik, bly, kadmium, krom och koppar, vilka vid upphettning kan övergå i gasfas eller förekomma i mycket

små partiklar i rökgaserna. Dessa ämnen kan transporteras långa sträckor i atmosfären och deponeras på mark eller i vatten (Tita et al., 2023).

Slutligen tillkommer utsläpp av stora mängder koldioxid från förbränningen av det organiska kolet i syraslammet, vilket gör processen mycket klimatpåverkande (Tita et al., 2023; Xu, 2007). Syraslam kan innehålla upp till 50% organiskt kol (Scenario B, 30 % TOC) vilket innebär att förbränningen medför betydande växthusgasutsläpp. I enighet med IPCC:s riktlinjer för nationella växthusgasinventeringar (2006) antas att 100% av det organiska kolet i syraslammet oxideras till koldioxid vid högtemperaturförbränning. Detta är standardpraxis vid klimatrapporering och gäller vid förbränning i högtemperaturanläggningar, exempelvis roterugnar och cementugnar (IPCC, 2006). Även EMEP/EEA:s emissionsinventeringshandbok (2019) utgår ifrån fullständig oxidation i industriella förbränningsprocesser. Därför antas i detta arbete att hela mängden organiskt kol i syraslammet (TOC) emitteras vid förbränningen.

5. Metod

Detta kapitel redogör för den metodik som används för att jämföra klimatpåverkan från två alternativa behandlingskedjor för syraslam. Utgångspunkten är att kvantifiera utsläpp av växthusgaser i form av koldioxidekvivalenter (CO₂e), samt att beakta emissioner av vissa hälsofarliga ämnen som svaveloxider, polycykliska aromatiska kolväten (PAH), flyktiga aromatiska kolväten (BTEX) med fler (se figur 1).

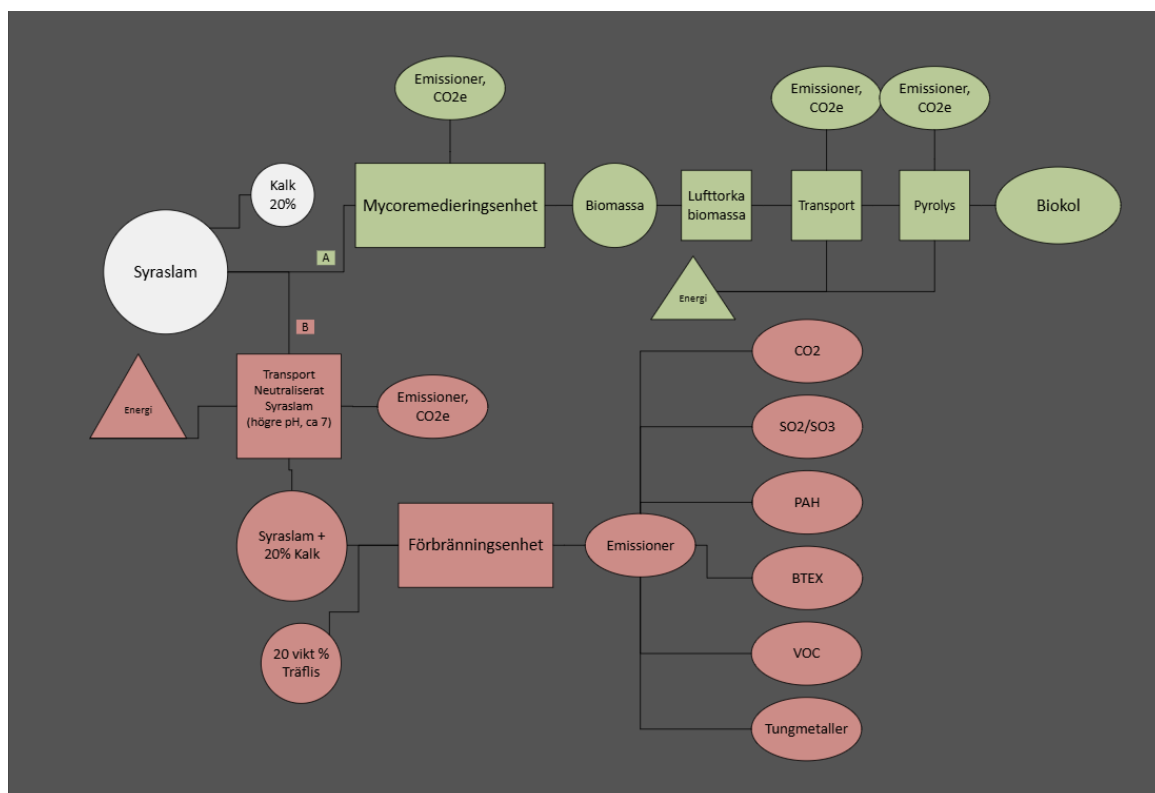
Analysen baseras på schablonvärden, litteratordata, antaganden och modeller för centrala processer i respektive behandlingskedja. Studien syftar inte till att genomföra en fullständig livscykelanalys, utan fokuserar på att jämföra de viktigaste skillnaderna mellan scenarierna från ett klimat och miljöperspektiv från respektive behandlingskedja.

5.1 Systemgränser och avgränsningar

Analysen utgår från en behandlad totalmängd om 50 000 ton syraslam från oljeraffinering. Två behandlingskedjor jämförs: (A) in situ mycoremediering med efterföljande pyrolys, och (B) ex situ förbränning med internationell transport. Beräkningarna genomförs med en funktionell enhet om 1 kg behandlat syraslam.

Systemgränserna omfattar processer med direkt klimatpåverkan: mycoremedieringens respiration, pyrolysens energiåtgång, biokolets funktion som kolinlagring, transport av material samt utsläpp från förbränning. Uppströmsprocesser som svampkulturproduktion, byggnation av anläggningar och produktion av tillsatsmaterial (t.ex kalk, träflis) inkluderas inte. Även energiåtgången för torkning av slammet och långsiktiga miljöeffekter av biokol eller askhantering ligger utanför analysen. Dessa avgränsningar är motiverade av databegränsningar samt behovet av att hålla analysen överskådlig och jämförbar. Underlaget till analysen bygger på vetenskaplig litteratur, direktkommunikation med MycoMines VD Magnus Ivarsson (2025) och generella antaganden om transportavstånd och emissionsfaktorer. Direkta mätningar har inte varit möjliga inom ramen för examensarbetet.

Systemgränserna och de ingående processtegen i respektive scenario illustreras i Figur 1 nedan.



Figur 1. Översiktligt processflöde för behandling av syraslam enligt scenario A (mycoremediering och pyrolys) och scenario B (transport och förbränning).

5.2 Antaganden och beräkningsförutsättningar

För att möjliggöra en jämförande analys av klimatpåverkan mellan två behandlingskedjor för syraslam, har ett antal antaganden varit nödvändiga. Dessa grundar sig på bristande tillgång till exakt data, variationer i källmaterialet och behovet av att förenkla för att möjliggöra en rättvis jämförelse mellan behandlingsleden.

Transport antas i båda scenarierna ske med stel lastbil (20 - 26 ton) och beräknas med olika emissionsfaktorer för tur- och returresor. Turresans emissioner beräknas med en emissionsfaktor på 0,866 kg CO₂e per kilometer, enligt data från Network of Transport Measures (2024). För båda scenarierna inkluderas även returresorna med tomma lastbilar i transportutsläppen. Dessa återresor sker utan last (0%) och har därför lägre bränsleförbrukning per kilometer. Emissionsfaktorn för returtransporter beräknas på 0,544 kg CO₂e/km, i enlighet med riktvärden från NTM (2024). Den totala klimatpåverkan från transportledet utgörs således av summan av fram- och återresor per transport.

Totala halten organiskt kol (TOC) i syraslammet antas vara 30% (motsvarande 300g kol per kg slam), vilket är ett representativt värde inom det intervall som rapporterats i litteraturen (15 - 70%). TOC avser i detta sammanhang andelen grundämnet kol i organiska föreningar.

I scenario A antas 50% av TOC mineraliseras till koldioxid genom svampens metabolism, medan resterande 50% binds i svampens biomassa. Denna kolanvändningseffektivitet (CUE) är i linje med uppgifter från både MycoMine och relevant litteratur om svampars kolomsättning (M.Ivarsson, personlig kommunikation, 2025).

Torkningen av biomassa sker genom lufttorkning utan aktiv energitillförsel, och dess klimatpåverkan anses försumbar. Den torkade biomassan innehåller cirka 10 % kvarvarande vatten och transporteras 200km till en pyrolysanläggning. I pyrolysen tillsätts träflis i samma mängd som den torkade svampbiomassan (1:1) för att förbättra struktur och stabilitet i den producerade biokolen. Träflisen omvandlas till biokol och betraktas därmed inte som en utsläppspost inom systemgränsen. Själva pyrolysisprocessen antas drivas med el enligt uppgifter från MycoMines VD Magnus Ivarsson (personlig kommunikation, 2025), och elförbrukningen uppskattas till 0,455 kWh per kg biomassa. Biokolet som genereras antas fungera som en kolsänka och tillför därmed inga nettoutsläpp av koldioxid inom systemgränsen.

I scenario B tillsätts 20 viktprocent kalk till syraslammet före transport, för att neutralisera dess sura pH. Det ger en transportvikt på 60 000 ton. Transportsträckan antas vara 1450km, motsvarande avståndet Stockholm - Frankfurt, vilket reflekterar fall där syraslam transporterats internationellt till Tyskland på grund av begränsad inhemsk infrastruktur för att behandla syraslam samt kapacitet. Vid förbränning antas att 100% av TOC mineraliseras till CO₂, och beräkningarna baseras på molmassförhållandet 44/12 (CO₂/C). Mängden av TOC som utsläpps som hälsofarliga föreningar (PAH, BTEX) räknas bara som förekomst/ icke förekomst och har inga kvantitativa värden. Träflis tillsätts motsvarande 20% av ursprunglig slamvikt, för att säkerställa effektiv förbränning.

5.2.1 Beräkning träflis

I Scenario B används träflis som stödbränsle. Då träflis utgör en förnyelsebar biogen resurs betraktas dess förbränning som klimatneutral i enighet med IPCC:s riktlinjer för växthusgasinventeringar. Enligt dessa riktlinjer redovisas inte utsläpp från biobränslen som ett nettotillskott till atmosfärisk koldioxid, under förutsättning att biomassan är hållbart producerad och att återväxt sker inom rimlig tidshorisont.

Träflisens förbränning inkluderas därför inte som en utsläppskälla i klimatberäkningarna för Scenario B, där det tillsätts 20 % träflis av ursprunglig slamvikt. Denna metod används för att möjliggöra en jämförbar beräkningsprincip även i scenario A, där träflis också förekommer som substrattillsats vid pyrolys i ett förhållande om 1:1 med mycelbiomassa.

I Scenario A antas biokolet som bildas från träflisen fungera som en kolsänka, medan den del av träflisens kolinnehåll som inte blir biokol betraktas som klimatneutral, det vill säga varken som utsläpp eller inlagring. För mycelbiomassan, som härstammar från det fossila organiska kolet i syraslammet, görs däremot en annan klimatvärdering. Biokolet från mycelbiomassan betraktas som klimatneutral, medan den del som inte omvandlas till biokol antas emitteras som koldioxid och redovisas som klimatpåverkande utsläpp.

Detta tillvägagångssätt säkerställer en konsekvent metodik där biogent och fossilt ursprunget kol behandlas utifrån ursprung och kolflöde. Syftet är att möjliggöra en rättvisande och jämförbar bedömning av klimatpåverkan mellan de två scenarierna.

5.3 Datakällor och emissionsfaktorer

De antaganden och emissionsvärden som använts i beräkningarna bygger på en kombination av vetenskaplig litteratur, tekniska rapporter, företagsinformation och databaser. Uppgifter om svampens kolanvändningseffektivitet (CUE), biomassatorkning och processvilkor för pyrolysen baseras på underlag från MycoMine samt relevanta studier om svampars kolmetabolism och pyrolys av organiskt avfall. Emissionsfaktorer kommer från Network of Transport Measures (NTM), där lastbilstransport med 10 tons lastkapacitet antas ge 0,866 kg CO₂e per kilometer. I scenario A antas pyrolysisprocessen förbruka cirka 0,455 kWh el per kilogram biomassa, baserat på mätdata från Cobos-Torres et al. (2024) för en elektrisk driven lågtemperaturreaktor. Klimatpåverkan från denna elförbrukning beräknas med livscykeldata från SMED (2021), där utsläppsfaktorn för nordisk elmix uppgår till 90,4 g CO₂e per kWh (Cobos-Torres et al., 2024; SMED, 2021). Halten organiskt kol i syraslam (30 %) har antagits med stöd från tidigare sammansättningsanalyser från syraslam och är inom intervallet om 15 - 70% TOC.

5.4 Beräkningsgång scenario A

1. Kolinnehåll i syraslam
 - Utgångspunkt: 50 000 ton syraslam med 30%TOC.
→ $50\,000 \times 0,30 = 15\,000$ ton kol
2. Mineralisering av kol under mycoremediering.
 - 50 % av kolet mineraliseras till CO₂
→ $15\,000 \times 0,5 \times (44/12) = 27\,500$ ton CO_{2e}
3. Resterande kol binds i mycelbiomassa.
 - 7 500 ton kol kvar → utgör 50% av biomassan.
→ $7\,500 \times 2 = 15\,000$ ton biomassa (torrvikt)
→ Lufttorkning till 10% fukthalt: $15\,000 \times 1,1 = 16\,500$ ton våtvikt
4. Transport av mycelbiomassa (200 km enkel väg, 10 ton/transport)
 - $16\,500 / 10 = 1650$ transporter
→ Tur (full last) $1650 \times 200\text{km} \times 0,866\text{kg CO}_2\text{e/km} = 285$ ton CO_{2e}
→ Retur (tom last) $1650 \times 200\text{km} \times 0,544\text{kg CO}_2\text{e/km} = 180$ ton CO_{2e}
5. Tillsats av träflis (förhållande 1:1, våtvikt)
 - Träflis 16 500 ton
 - Total biomassa till pyrolys (ww): $16\,500 + 16\,500 = 33\,000$ ton
6. Elanvändning pyrolys
 - Elförbrukning: 0,455 kWh/kg
→ $33\,000\,000\text{ kg} \times 0,455 = 15\,015\,000$ kWh
→ $15\,015\,000 \times 0,0904 = 1357$ ton CO_{2e}
7. Biokolutbyte och kolretention (endast mycelbiomassan)
 - Biokolutbyte: 35% av 15 000 ton (torrvikt) = 5 250 ton biokol
 - Kolinnehåll: 60% → $5250 \times 0,6 = 3\,150$ ton kol i biokolen
 - Kolretention: $3150 / 7500$ (kol i mycelbiomassan) = 42%
8. Resterande kol i pyrolys (CO₂/bio olja)
 - $7\,500 - 3\,150 = 4\,350$ ton kol
→ $4350 \times (44/12) = 15\,950$ ton CO_{2e}
9. Kolsänka biokol från träflis
 - $3\,150$ ton kol $\times (44/12) = 11\,550$ ton CO_{2e} (negativa utsläpp)
10. Netto utsläpp från pyrolys
→ $15\,950 - 11\,550 = 4\,400$ ton CO_{2e}

Totala utsläpp Scenario A: 33 722 ton CO_{2e}

5.5 Beräkningsgång scenario B

1. Slamvikt efter kalkning (20 %)

→ $50\,000 \times 1,2 = 60\,000$ ton behandlat slam (båda scenarierna men bara relevant i Scenario B)

2. Transport till förbränning (1450 km enkel väg, 10 ton per lastbil)

→ Antal transporter: $60\,000/10 = 6000$

→ Tur (full last) $6\,000 \times 1450 \times 0,866 = 7\,534$ ton CO₂e

→ Retur (tom last): $6000 \times 1450 \times 0,544 = 4\,733$ ton CO₂e

3. Förbränning av allt organiskt kol i slammet (15 000 ton)

→ $15\,000 \times (44/12) = 55\,000$ ton CO₂e

4. Träflistillsats (20% av ursprunglig slamvikt)

Räknas inte in då dessa utsläpp räknas som netto noll, i enighet med IPCC:s guidning.

Totala utsläpp Scenario B: 67 267 ton CO₂e

6. Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten från jämförelsen av klimatpåverkan och miljöeffekter för de två behandlingskedjorna för syraslam inom systemgränserna. Scenario A (mycoremediering in situ följt av torkning och pyrolys) och Scenario B (transport och förbränning ex situ). Utsläpp av koldioxidekvivalenter kvantifierades baserat på kolflöden, transportavstånd och energianvändning, medan andra miljöfarliga emissioner bedömdes kvalitativt. Resultaten redovisas i figuren 2 - 5.

Totala CO₂e utsläpp för båda scenarierna visas i Figur 2 och sammanfattas i Figur 5. Scenario A genererade 33 722 ton CO₂e, medan Scenario B resulterade i 67 267 ton CO₂e, vilket motsvarar en reduktion på 50 % för Scenario A, eller en absolut minskning jämfört med Scenario B om 33 545 ton CO₂e.

Scenario A: Mycoremediering och pyrolys

Utsläppen i Scenario A härrör från 4 processer, illustrerade i Figur 2.

- Mycoremediering: 27 500 ton CO₂e, motsvarande mineralisering av 50% av det organiska kolet (15 000 ton kol) till koldioxid via svampmetabolismen, baserat på en kolanvändningseffektivitet (CUE) om 50%.
- Transport: 465 ton CO₂e, från transport av 16 500 ton torkad biomassa över 200 km enkelväg med lastbil. Emissionsfaktorn för turesor med full last var 0,866 kg CO₂e/km, och för returesor utan last 0,544 kg CO₂e/km. Båda sträckorna inkluderades i utsläppsberäkningen.
- Elförbrukning pyrolys: 1 357 ton CO₂e, från elförbrukning om 0,455 kWh per kg biomassa (33 000 ton total biomassa) och en emissionsfaktor för nordisk elmix om 90,4 g CO₂e/kWh.
- Pyrolysemissioner: 4 400 ton CO₂e, under pyrolysen bildades 5 250 ton biokol, motsvarande 35 % av torrvikten från mycelbiomassan. Biokolets kolandel på 60% resulterade i 3 150 ton bundet biokol, som inte emitteras och därmed betraktas som klimatneutralt trots fossilt ursprung. Resterande 4 350 ton kol från mycelbiomassan antas emitteras som CO₂. Med molmassförhållandet (44/12) motsvarar detta 15 950 ton CO₂. Samtidigt antas biokolet från träflisen – också 3 150 ton kol – bidra som kolsänka motsvarande 11 550 ton CO₂e. Resterande emissioner från träflisen betraktas som klimatneutrala då ursprunget är förnybart.

Den sammanlagda nettoemissionen från pyrolysen (exklusive energiåtgång) uppgår därför till 4 400 ton CO₂e.

Scenario B: Transport och förbränning

I Scenario B härstammar utsläppen från två huvudprocesser, redovisade i figur 2.

- Förbränning: 55 000 ton CO₂e, från fullständig oxidation av 15 000 ton organiskt kol (TOC) till koldioxid, baserat på antaganden om 100% mineralisering i enighet med IPCC:s riktlinjer (2006).
- Transport: 12 267 ton CO₂e, från transport av 60 000 ton kalkstabiliserat slam (50 000 ton syraslam + 20% kalk) över 1450 km enkelväg (Stockholm-Frankfurt) med lastbil. Emissionsfaktorn för turer med full last var 0,866 kg CO₂e/km, och för returresor utan last 0,544 kg CO₂e/km.

Emissionerna av de 20% träflis som tillsattes i förbränningen exkluderas från klimatpåverkan enligt IPCC:s riktlinjer, då biomassans kolcykel betraktas som klimatneutral.

Transportrelaterade utsläpp

Transportutsläppen av CO₂e, redovisade i Figur 4, är betydligt högre i Scenario B (12 267 ton) än i Scenario A (465 ton), en skillnad på cirka 26 gånger. Scenario B står för 96 % jämförelsevis av de totala transportutsläppen, vilket primärt beror på det lägre transportavståndet samt den högre vikten på 60 000 ton (syraslam med kalk). I Scenario A behöver endast mycelbiomassan, bildad från syraslammets 30% organiska kol (TOC) transporteras, vilket avsevärt minskar transportens klimatbelastning.

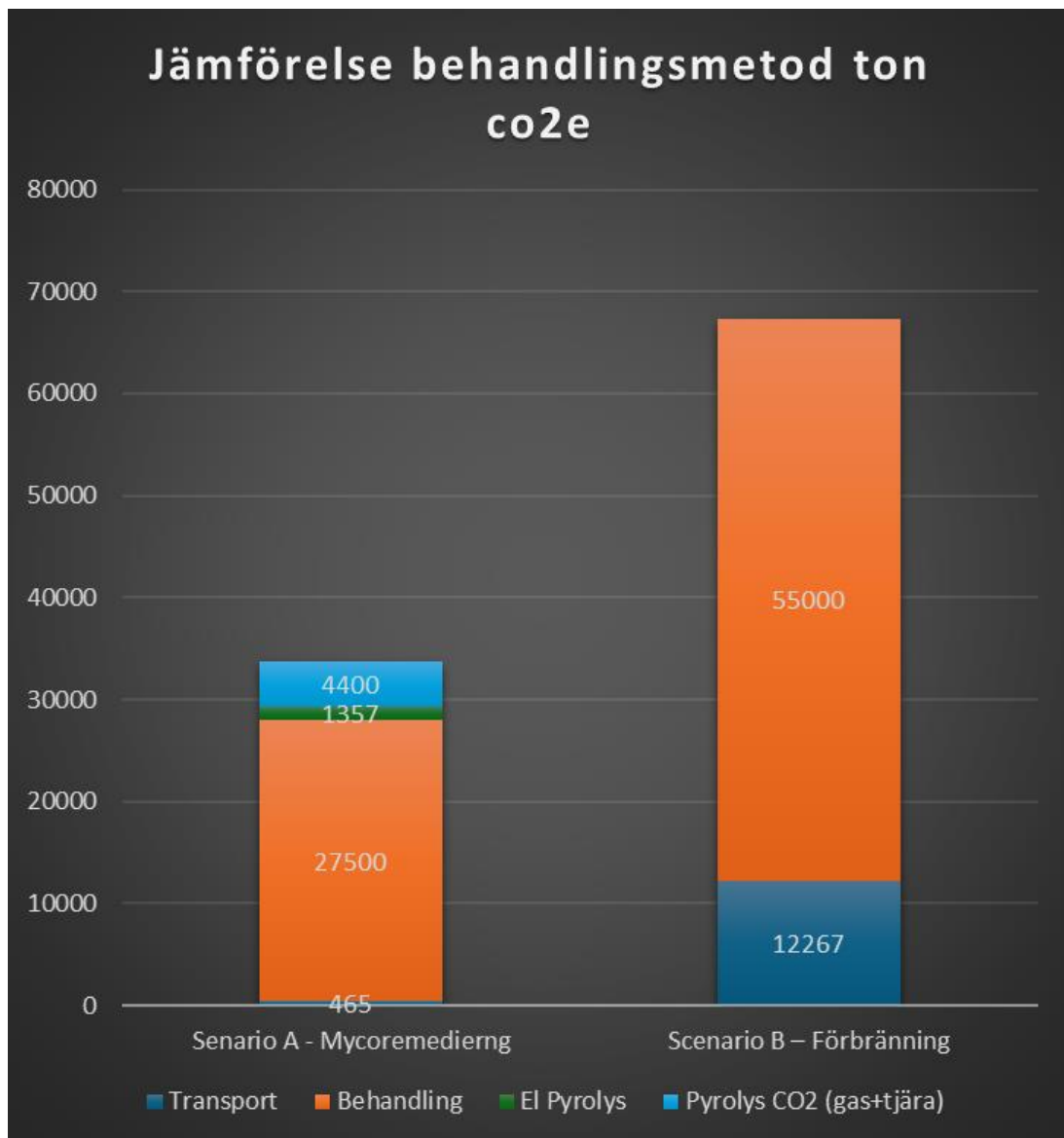
Utsläpp av övriga ämnen

Utöver växthusgasutsläpp uppvisar de två behandlingskedjorna skillnader i potentiella utsläpp av andra miljö- och hälsofarliga ämnen. I scenario B, där slammet förbränns efter kalkstabilisering, förekommer utsläppskategorier såsom svaveloxider (SO_x), PAH, BTEX, andra flyktiga organiska föreningar (VOC) samt tungmetaller. Dessa ämnen har identifierats som typiska emissionsprodukter vid förbränning av syraslam.

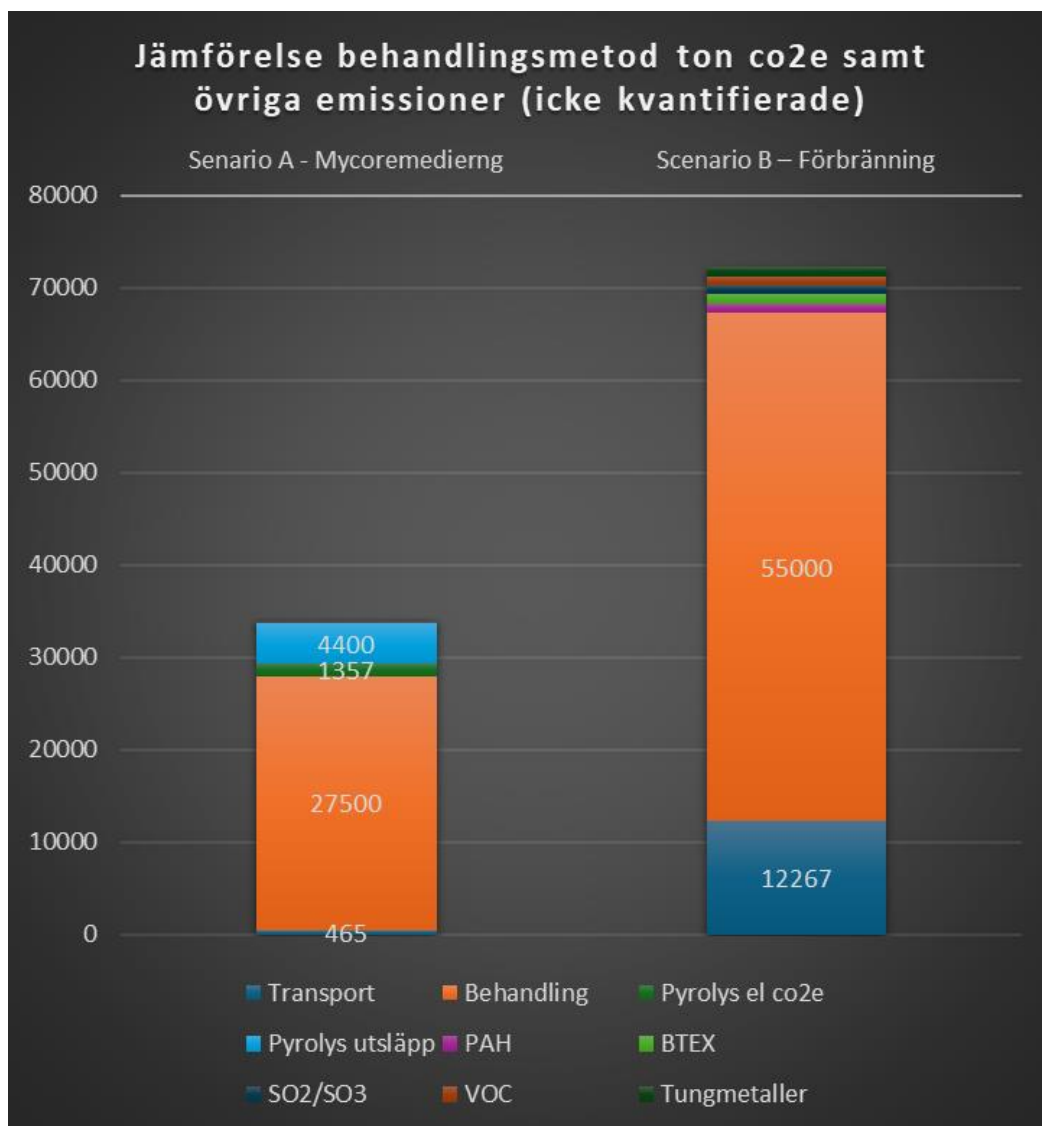
I scenario A förekommer inga registrerade utsläpp av dessa ämnen. Den termiska behandlingen sker under syrefria förhållanden och lägre temperaturer än i Scenario B:s högtemperaturförbränning, vilket minskar risken för flyktiga emissioner. Eventuella metallinnehåll stannar kvar i det fasta biokolet. Skillnaderna i utsläppstyper mellan scenario A och B illustreras översiktligt i figur 3.

Sammanfattning resultat

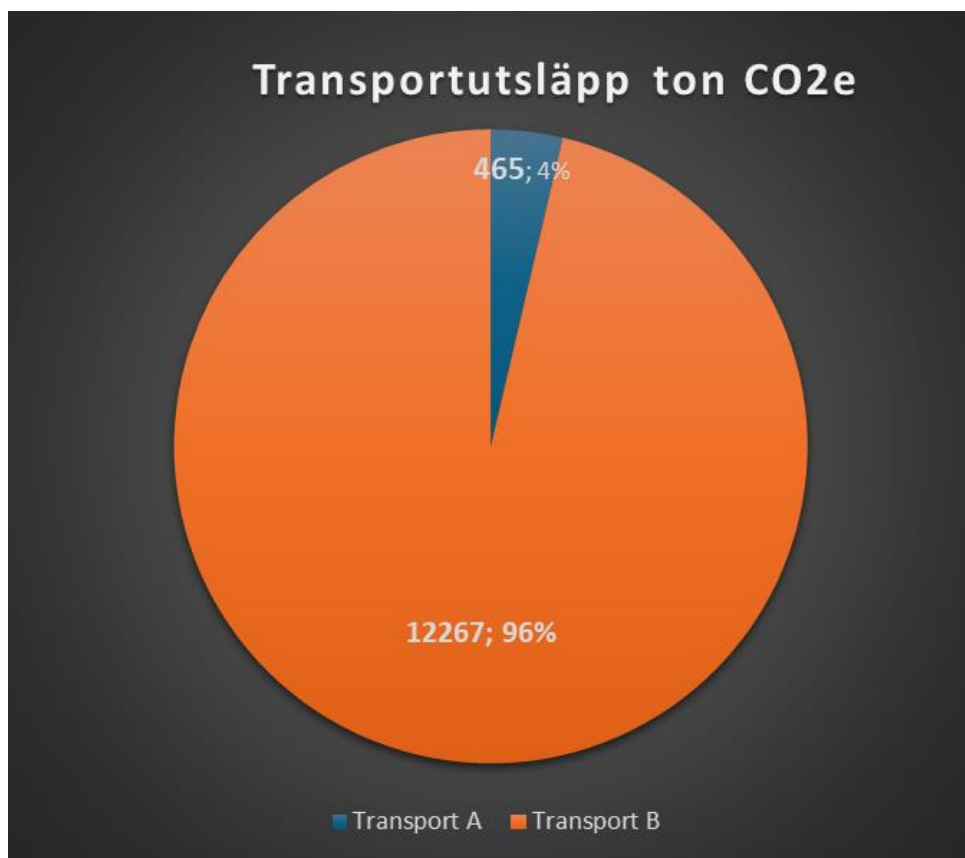
Scenario A uppvisar en 50% lägre klimatpåverkan än Scenario B, drivet av minskande transportutsläpp, tack vare att endast mycelbiomassan transporteras, samt långsiktig kolinlagring av biokol. Förbränning i Scenario B genererar betydande utsläpp och risk för miljöfarliga emissioner, medan Scenario A undviker dessa risker genom en biologisk behandlingsväg. Resultaten indikerar att mycoremediering följt av pyrolys är ett mer klimat- och miljömässigt fördelaktigt alternativ för hantering av syraslam.



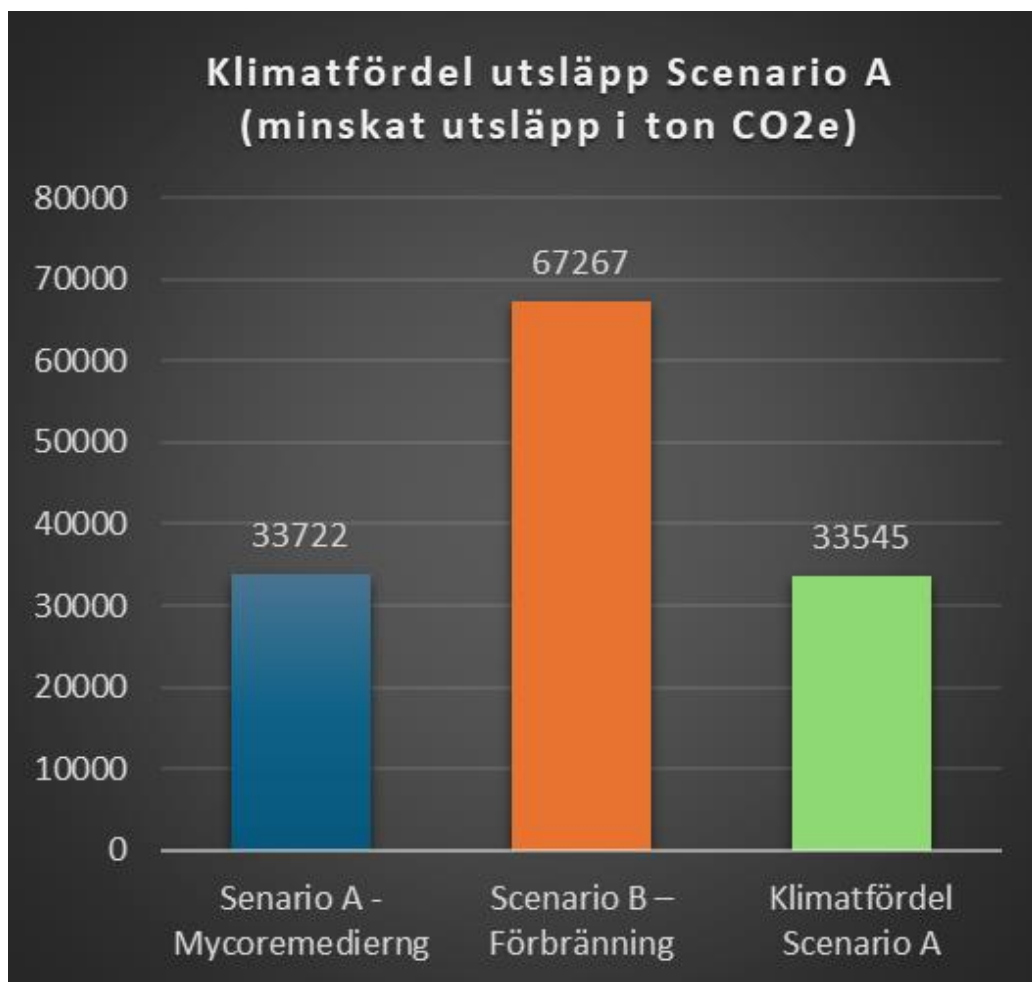
Figur 2. Totala utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO₂e) för substrat, behandling och transport i scenario A och B. Färgsegmenten i staplarna representerar olika utsläppskategorier: För scenario A - blått: transport av torkad biomassa, orange: respiration från mycoremediering, grönt: elförbrukning vid pyrolys; för scenario B - blått: transport av kalkstabiliserat slam, orange: förbränning syraslam, grönt: förbränning träflis.



Figur 3. Sammanställning av klimatpåverkan och emissionskategorier för behandlingsscenarierna A och B. Staplarna visar totala klimatpåverkan i ton CO₂e, likt figur 2, samt övriga emissionskategorier kvalitativt (icke kvantifierade) PAH, BTEX, SO₂/SO₃, VOC och tungmetaller. De övriga utsläppen saknar kvantitet och illustreras endast för att påvisa dess sannolika förekomst.



Figur 4. Transportrelaterade utsläpp av koldioxidekvivalenter i scenario A och B. Scenario B genererar drygt 26 gånger högre utsläpp i transportledet jämfört med scenario A. Procentsatserna (4- och 96%) används för att illustrera skillnaden i utsläppsnivå mellan scenarierna.



Figur 5. Klimatpåverkan i form av utsläpp av koldioxidekvivalenter för behandling av 50 000 ton syraslam. Den gröna stapeln visar den absoluta klimatfördelen med Scenario A jämfört med Scenario B, motsvarande en minskning om 33 545 ton CO₂e.

7. Känslighetsanalys

För att bedöma robustheten hos resultaten och undersöka hur osäkerheter i nyckelparametrar påverkar klimatpåverkan genomfördes en känslighetsanalys. Fyra parametrar varierades: kolanvändningseffektivitet (CUE) i mycoremedieringen, biokolutbyte vid pyrolys, elmix för pyrolys, samt kalkmängd i scenario B. Analysen utfördes för fyra fall: 1 CUE i Scenario A varierades till 30% och 70%, 2 biokolutbyte i Scenario A varierades till 20 % och 50%, 3 elmixen för Scenario A ändras till europeisk (0,292 kg CO₂e/kWh, enligt Our World in Data, 2024) och kolbaserad (0,8 kg CO₂e/kWh, inom intervallen om 0,72-0,91 från IPCC, 2014), och 4 kalkmängd i Scenario B varierades till 10% och 40%. Dessa fall valdes för att testa parametrar med hög osäkerhet och praktisk relevans, såsom effektiviteten i mycoremediering, biokolproduktionens utbyte, energikällans klimatpåverkan och kalkanvändningens effekt på transport. Beräkningarna följer metodavsnittet, inklusive antaganden om 50 000 ton syraslam, emissionsfaktorer för transport (0,866kg CO₂e/km) och el (0,0904 kg CO₂e/kWh), samt systemgränser som exkluderar kärnprocesser (se figur 1), såsom uppströmsprocesser (t.ex kalkbrytning) och nedströmsprocesser (t.ex askhantering). Den procentuella skillnaden i utsläpp beräknas som:

$$\text{Skillnad \%} = ((\text{Scenario B utsläpp} - \text{Scenario A utsläpp}) / (\text{Scenario B utsläpp})) \times 100$$

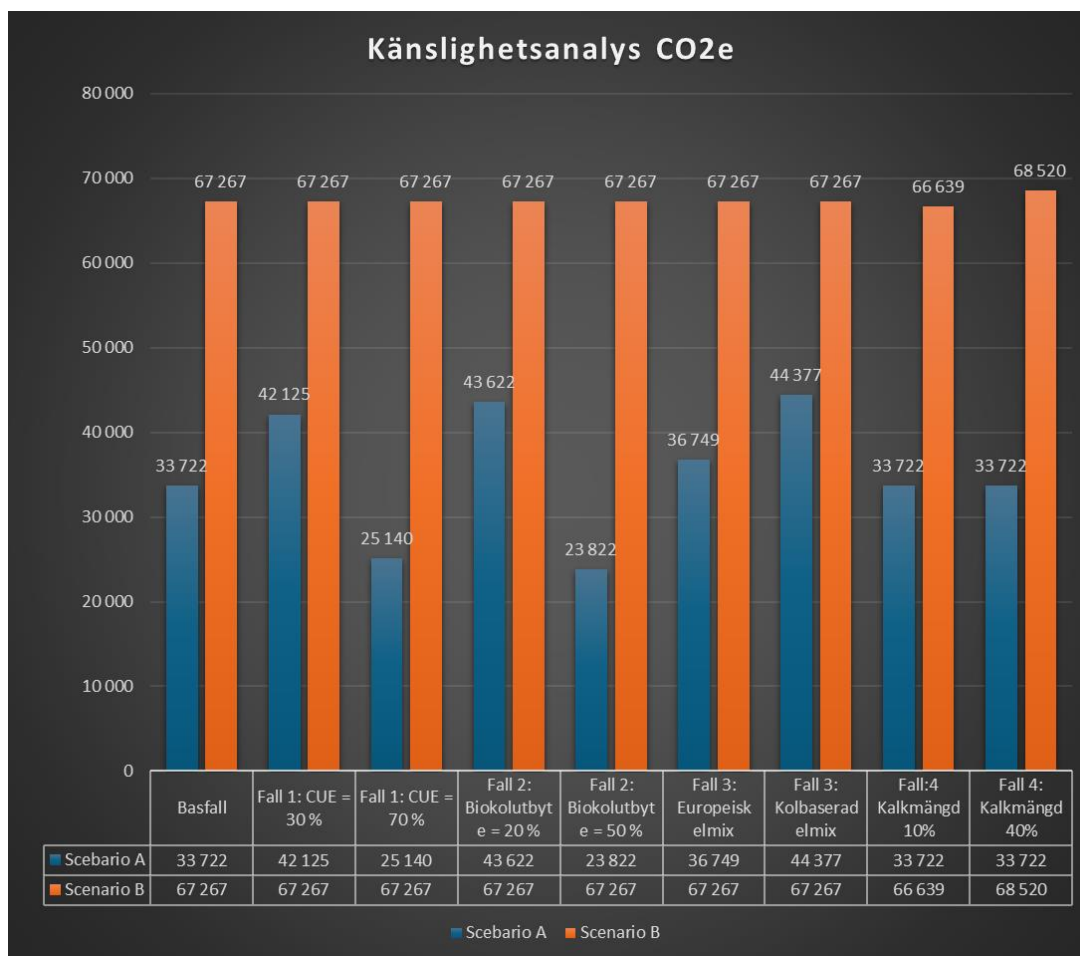
7.1 Resultat känslighetsanalys

Resultaten av känslighetsanalysen presenteras i Tabell 1 samt grafiskt i figur 6.

Tabell 1. Totala utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO₂e) för Scenario A och Scenario B, samt den procentuella skillnaden mellan dem. Fallen inkluderar: Basfall, Fall 1 (CUE 30 respektive 70%), Fall 2 (Biokolutbyte 20 respektive 70%), Fall 3 (Europeisk och Kolbaserad elmix), och Fall 4 (Kalkmängd 10 respektive 40%).

Fall	Scenario A (ton CO ₂ e)	Scenario B (ton CO ₂ e)	Skillnad (%)
Basfall	33 722	67 267	50
Fall 1: CUE =30%	41 125	67 267	39

Fall 1: CUE =70%	25 140	67 267	63
Fall 2: Biokolutbyte =20%	43 622	67 267	35
Fall 2: Biokolutbyte =50%	23 822	67 267	65
Fall 3: Europeisk elmix	36 749	67 267	45
Fall 3: Kolbaserad elmix	44 377	67 267	34
Fall 4: Kalkmängd =10%	33 722	66 639	49
Fall 4: Kalkmängd =40%	33 722	68 520	51



Figur 6. Totala utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO₂e) för Scenario A (blå staplar) och Scenario B (orange staplar) över olika fall: Basfall, Fall 1 (CUE 30 respektive 70%), Fall 2 (Biokolutbyte 20 respektive 70%), Fall 3 (Europeisk och Kolbaserad elmix), och Fall 4 (Kalkmängd 10 respektive 40%). Y-axeln representerar utsläpp i ton CO₂e, medan x-axeln visar de olika fallen.

7.2 Diskussion av känslighetsanalys

Känslighetsanalysen visar att resultatet i scenariojämförelsen är robust men inte opåverkat av variationer i nyckelparametrar. Även vid ogynnsamma antaganden, såsom låg CUE (30%) eller lågt biokolutbyte (20%), uppvisar Scenario A fortfarande en lägre klimatpåverkan än Scenario B, om än med minskad marginal. Detta indikerar att det biologiska alternativet behåller en klimatfördel även under mer ogynnsamma tekniska förutsättningar.

Störst påverkan på resultaten har biokolutbytet, vilket är logiskt eftersom det direkt avgör hur mycket kol som lagras långsiktigt som biokol. Skillnaden mellan 20 % och 50 % utbyte påverkar Scenario A:s utsläpp med nästan 20 000 ton

CO₂e. Detta understryker behovet av att optimera pyrolysisprocessen, både tekniskt och med avseende på val av råmaterial (biologiskt förnyelsebart), för att maximera klimatnyttan av behandlingsmetoden.

Elmixen för pyrolysen har också betydande påverkan. Vid användning av en kolintensiv elmix ökar utsläppen i Scenario A med 10 655 ton CO₂e (jämfört med basfallet där svensk elmix antogs), vilket reducerar klimatfördelen till 34% jämfört med Scenario B (från 50% i basfallet). Detta visar att klimatfördelen med biologisk behandling kan urholkas om processenergin kommer från fossila källor. Resultatet betonar vikten av att säkra tillgång till förnybar el i implementeringen av pyrolystekniker.

Variationen i kalkmängd i scenario B har en mindre men betydande påverkan. Vid 40 % kalkning ökar utsläppen vid transport med 1 253 ton, jämfört med basfallet om 20 %. Detta förklaras av att kalken ökar den totala massan som måste transporteras. Det är dock viktigt att notera att analysen inte inkluderar utsläpp från brytning/produktion av kalken, vilket kan vara betydande.

Sammanfattningsvis visar känslighetsanalysen att resultatet är relativt robust, men också att nyckelparametrar - särskilt biokolutbyte och elmix - har stor inverkan på det slutliga resultatet. Det stärker behovet av att vid framtida forskning optimera tekniska val och ett systemperspektiv som inkluderar både uppströms- och nedströmsprocesser för att säkerställa bästa möjliga tekniker och nyckelparametrar för störst klimatnytta.

8. Diskussion

Miljö- och klimatfördelar med biologisk behandling.

Studiens resultat visar att Scenario A, som involverar mycoremediering flöjt av pyrolys, genererar 50 % lägre utsläpp av koldioxidekvivalenter (33 722 ton) jämfört med Scenario B, som baseras på långväga transport och förbränning (67 267 ton). Resultatet indikerar att biologiska behandlingsmetoder i kombination med kolinlagring kan utgöra ett konkurrenskraftigt alternativ till konventionell termisk avfallshantering, särskilt vid behandling av kolrikt farligt avfall som syraslam.

En central slutsats är att in situ-behandling, som i Scenario A, betydligt minskar klimatpåverkan genom att eliminera behovet av potentiellt långväga transporter. Transportutsläppen i Scenario B (12 267 ton CO₂e) står för en betydande del av dess totala klimatpåverkan, vilket understryker hur geografisk närhet till behandlingsanläggningar är en viktig faktor. Detta resultat pekar på vikten av att utveckla loka eller mobila behandlingslösningar för farligt avfall, speciellt i regioner med begränsad infrastruktur för specialbaserad avfallshantering för farligt avfall. Vidare bidrar biokolets funktion som kolsänka i Scenario A till att ytterligare minska nettoutsläppen, vilket stödjer globala mål om netto-nollutsläpp. Biokolets potential att binda kol långsiktigt (hundratals år) gör det till en lovande resurs för att motverka klimatförändringar, samtidigt som dess användning som jordförbättringsmedel kan hindra läckage av näringsämnen i jordbruket och bidra till en mer cirkulär ekonomi.

Minskade miljöfarliga utsläpp.

Utöver klimatpåverkan visar den kvalitativa analysen att Scenario A minimerar risken för atmosfäriska utsläpp av miljöfarliga ämnen som svaveloxider, PAH, BTEX och tungmetaller, vilka kan vara betydande i Scenario B på grund av den direkta oxidationen av flyktiga organiska föreningar som resultat av förbränningen. Slutsatsen är att mycoremediering och pyrolys inte bara är ett klimatsmartare hanteringsval, utan även minskar riskerna för mark-, vatten- och luftföroreningar samt allmän hälsopåverkan. Anmärkningsvärt är hur svamparnas enzymatiska nedbrytning omvandlar komplexa organiska föroreningar till biomassa, vilket, om tekniken implementeras i verkliga scenarier, har potential att både neutralisera syraslammets miljöfarliga innehåll och lösa problematiken med utspridda ohanterade deponier av syraslam.

Tekniska nyckelparametrar och analysens robusthet.

Känslighetsanalysen stärker resultatens robusthet och belyser samtidigt viktiga nyckelparametrar. Biokolutbytet och elmixen för pyrolysen är särskilt kritiska parametrar för att klimatnyttan av Scenario A. Ett lägre biokolutbyte eller användning av en kolbaserad elmix minskar Scenario A:s fördel, vilket understryker behovet av att behandlingskedjan bör prioritera högeffektiva pyrolysisprocesser och integration av gröna energisystem för att maximera klimatnyttan. Samtidigt måste kolstabiliteten tas hänsyn till, då högre temperatur ger lägre biokolutbyte men högre kolstabilitet och det omvända för lägre pyrolysystemtemperaturer.

Variationer av kalkmängd i Scenario B visar att transportens klimatpåverkan är kopplad till avstånd och totalvikt men tar inte hänsyn till uppströms processer av kalkens klimatpåverkan vilket bör tas hänsyn till i framtida studier.

Ekonomiska aspekter och bästa möjlig teknik.

Utöver klimat- och miljöfördelarna visar studien att ekonomiska aspekter ytterligare stärker Scenario A:s attraktivitet. Behandlingskostnaderna för mycoremediering följt av pyrolys uppskattas till cirka 2 000 kr per ton syraslam, betydligt lägre än de 7 000 - 10 000 kr per ton som krävdes för transport och förbränningsalternativet i Scenario B. Denna kostnadsskillnad, som kan uppgå till 8 000 kr per ton, härrör från in situ- behandlingens eliminering av långväga transporter samt en mindre resursintensiv processkedja. Enligt miljöbalkens krav på bästa möjliga teknik, ska val av behandlingsmetod balansera miljönytta och ekonomisk rimlighet, och Scenario A:s lägre kostnader gör det till ett konkurrenskraftigt alternativ som uppfyller dessa kriterier. De ekonomiska fördelarna kan underlätta storskalig sanering av syraslamdeponier, särskilt i regioner med begränsade resurser där den ekonomiska faktorn är avgörande för möjligheten att remedierna de hälsofarliga deponierna. Samtidigt bör framtida forskning inkludera detaljerade ekonomiska analyser av investeringskostnader för pyrolys- och mycoremedieringsanläggningar för att säkerställa metodens skalbarhet och praktiska genomförbarhet.

Mot hållbar avfallshantering: Slutsatser och framtida forskning.

En bredare implikation av resultaten är att biologiska metoder som mycoremediering kan spela en nyckelroll i omställningen till mer hållbara avfallshanteringsstrategier. Traditionella hanteringsmetoden med förbränning, även om etablerad och effektiv, står i konflikt med Parisavtalets mål på grund av deras höga utsläpp och begränsade möjligheter till resursåtervinning. Scenario A:s förmåga att omvandla syraslam till biokol utan att riskera hälsofarliga atmosfäriska utsläpp, illustrerar hur innovativa tekniker kan skapa mervärde från farligt avfall. Detta är relevant i en tid där miljölagstiftning alltmer betonar resurseffektivitet, begränsande koldioxidutsläpp och minimerad miljöpåverkan.

Resultaten bör dock tolkas med viss försiktighet. Analysen bygger på schablonvärden och antaganden, och faktorer som svampens kolanvändningseffektivitet, pyrolysens energibehov och syraslammets sammansättning kan variera i praktiken. Dessutom exkluderar analysens systemgränser uppströmsprocesser som kalkproduktion, anläggningsproduktion och nedströmsprocesser som askhantering, vilket kan påverka resultatens totala klimatpåverkan. Framtida forskning bör fokusera på att verifiera analysens antaganden genom fältstudier och fullständig livscykelanalys om så är möjligt, för att ge en mer holistisk bild av behandlingskedjornas miljöeffekter.

Sammanfattningsvis visar studien att Scenario A är ett lovande alternativ för hantering av syraslam, med potential att minska både klimatpåverkan och miljöfarliga utsläpp jämfört med traditionell förbränning. Resultaten understryker vikten av att prioritera in situ- lösningar, optimera tekniska processer och integrera förnybar energi för att maximera klimatnyttan. Studien bidrar därmed till en växande kunskap om biologiska behandlingsmetoder och kan bidra i att vägleda beslutsfattare inom avfallshantering och oljeindustrin mot mer hållbara strategier för hantering av kolrika, farliga avfall.

9. Referenser

- Afshar, M. & Mofatteh, S. (2024). Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering*, 23, 102433. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102433.
- Akhtar, N. & Mannan, M.A. (2020). Mycoremediation: An unexplored gold mine. In: *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-821007-9.00002-4.
- Bridgwater, A.V., 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, s. 68–94.
- Chai, L., Liang, W., Wang, H., Huang, S., Wang, W., Peng, C., Li, J. and Qiu, R., 2022. Recycling heavy metal-contaminated biomass: An emerging and sustainable strategy for environmental remediation and resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 364, p.132633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132633>
- Cobos-Torres, J.-C., Izquierdo, J. & Alvarez-Vera, M. (2024). Energy Efficiency of Lignocellulosic Biomass Pyrolysis in Two Types of Reactors: Electrical and with Primary Forest Biomass Fuel. *Energies*, 17(12), 2943. <https://doi.org/10.3390/en17122943>
- EEA (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: 1.A.1 – Public electricity and heat production*. European Environment Agency. Tillgänglig: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Fransson, M. (2009). Inventering av Tabergsåns avrinningsområde: Inventering av pågående och nedlagda miljöfarliga verksamheter samt potentiellt förorenade områden. Länsstyrelsen i Jönköpings län, Meddelande 2009:27. Tillgänglig via: www.lansstyrelsen.se/jonkoping.
- Frolov, A.F., Titova, T.S., Karpova, I.V. & Denisova, T.L. (1985). *Composition of acid tars from sulfuric acid treatment of petroleum oils*. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 21(6), pp. 326–327. <https://doi.org/10.1007/BF00724086>
- Gruß, D., 2004. Project management of complex contaminated site projects using the example of acid tar remediation in Chemnitz. Presentation at Workshop Altlastenmanagement, Ökotech, Budapest, 27 October 2004.
- Gupta, S. och Pathak, B., 2020. Mycoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons. I: *Abatement of Environmental Pollutants*. Elsevier, s. 127–144.
- Haider, G., Steffens, D., Müller, C., Kammann, C.I., 2017. Standard biochars decrease nitrate leaching and increase nutrient retention in a silty-loam soil. *Soil Use and Management*, 33(4), pp. 536–545. <https://doi.org/10.1111/sum.12371>
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I.S., Heredia-Guerrero, J.A., Athanassiou, A., 2017. Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*, 7, 41292. <https://doi.org/10.1038/srep41292>

- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Chapter 2: Stationary Combustion*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
Tillgänglig: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- IPCC (2014). *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*. I: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
Tillgänglig: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
- Jones, M., Bhat, T., Wang, C.H., John, S., 2020. Mycelium Composites: A Review of Engineering Characteristics and Growth Kinetics. *Journal of Bionic Engineering*, 17(5), pp. 860–876. <https://doi.org/10.1007/s42235-020-0041-6>
- Karušs, J., Lamsters, K., Poršņovs, D., Zandersons, V., & Ješkins, J. (2021). Geophysical mapping of residual pollution at the remediated Inčukalns acid tar lagoon, Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 70(3), 140–151.
<https://doi.org/10.3176/earth.2021.10>
- Kijo-Kleczkowska, A., Środa, K., Kosowska-Golachowska, M., Musiał, T., & Wolski, K. (2016). Experimental research of sewage sludge with coal and biomass co-combustion, in pellet form. *Waste Management*, 53, 165–181
- Kinney, T.J., Masiello, C.A., Dugan, B., Hockaday, W.C., Dean, M.R., Zygourakis, K. and Barnes, R.T., 2012. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, 41, pp. 34–43.
- Laird, D.A., Fleming, P., Wang, B., Horton, R. and Karlen, D.L., 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), pp. 436–442. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- Lehmann, J. och Joseph, S., 2015. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd ed. Routledge.
- Leonard, S.A., Stegemann, J.A. & Roy, A. (2010). Characterization of acid tars. *Journal of Hazardous Materials*, 175, pp.382–392. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.015.
- Marmsjö, G. & Hoffman, J. (2014). Fortum Värme – Högtemperaturbehandling av avfall i panna Högdalenverket. Fortum Värme.
- Milne, D.D., Clark, A.I. & Perry, R. (1986). Acid tars: their production, treatment and disposal in the U.K. *Waste Management & Research*, 4(4), pp.407–418. doi: 10.1016/S0734-242X(86)80048-9.
- Our World in Data (2024). *Carbon intensity of electricity, EU-27*. Tillgänglig: https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart®ion=Europe&country=EU-27&WORLDWIDE=OWID_EU27
- Parasnis, M. S., Deng, E., Yuan, M., Lin, H., Kordas, K., Paltseva, A., Frimpong Boamah, E., Judelsohn, A., & Nalam, P. C. (2024). Heavy Metal Remediation by Dry

- Mycelium Membranes: Approaches to Sustainable Lead Remediation in Water. *Langmuir*, 40(12), 6317–6329.
- Radovanović, D., Štulović, M., Gajić, N., Đokić, J., Petronijević, N. och Kamberović, Ž., 2024. The impact of disposed petrochemical waste on the environment – the case of acid tar. XV Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Book of Proceedings, Banja Luka, Republic of Srpska.
- Sandgren, A. & Nilsson, J. (2021). Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export: Utredning av lämplig systemgräns för elmix samt beräkning av det nordiska elsystemets klimatpåverkan. SMED Rapport Nr 4 2021. På uppdrag av Naturvårdsverket. Tillgänglig via: www.smed.se
- Skoglund, N., Öhman, M., & Boström, D. (2016). Combustion of wood and demolition wood with sewage sludge in fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 141, 158–166.
- SUBR:IM (2007). SUBR:IM Bulletin 07 – Acid Tars: State of the art update on science, assessment and remediation. University of Sheffield & GMGU. Tillgänglig via: www.subrim.org.uk (hämtad via bulletin PDF).
- Tita, M., Tita, D., Onutu, I., Chis, T. & Tarnu, L.I. (2023). Treatment of acid tars by encapsulation to reduce the effects of pollution on the environment. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 19, pp.1329–1340. doi: 10.37394/232015.2023.19.120.
- World Bank. (2021). *Investment in disaster risk management in Europe makes economic sense: Background report – Economics for disaster prevention and preparedness*. Washington, DC: World Bank. https://civil-protection-knowledge-network.europa.eu/system/files/2024-04/wb_ec_2021_disaster_economics_investments_background_c1_1.pdf
- Xu, H. (2007). Acid Tar Lagoons: Assessment and Environmental Interaction. PhD thesis, University of Sheffield.
- Zhang, M., Wang, L., Li, D., Mujumdar, A.S. och Wang, Y., 2021. Comparative evaluation of selected drying methods for shiitake mushroom (*Lentinula edodes*). *Foods*, 10(11), s.2836. <https://doi.org/10.3390/foods10112836>

