

# RE: SOURCE

Slutrapport för projekt

---

## Hydrotermisk karbonisering: en praktisk avfallsbehand- lingsmöjlighet?

---

Projektperiod: juli till december 2017  
Projektnummer: 44264-1

Med stöd från:



STRATEGISKA  
INNOVATIONS-  
PROGRAM

## Hydrotermisk karbonisering: en praktisk avfallsbehandlingsmöjlighet?

## Hydrothermal carbonization: a practical waste treatment option?

Titel på projektet – svenska Hydrotermisk karbonisering: en praktisk avfallsbehandlingsmöjlighet?
Titel på projektet – engelska Hydrothermal carbonization: a practical waste treatment option?
Universitet/högskola/företag Luleå tekniska universitet
Adress 971 87 Luleå
Namn på projektledare Lale Andreas
Namn på ev övriga projektdeltagare Erik Marklund
Nyckelord: 5-7 st Hydrotermisk karbonisering (HTC), kol, avfallsbehandling, spårelement, massbals, bygg- och rivningsavfall

Med stöd från:



STRATEGISKA  
INNOVATIONS-  
PROGRAM

## Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten via det strategiska innovationsprogrammet RE:Source med samfinansiering från Luleå tekniska universitet.

Referensgrupp utgjorts av Johnny Bergman vid RGS Nordic och Mikko Mäkelä vid Aalto Universitet, Finland.

Projektgruppen vill tacka referensgruppen, labbpersonalen i LTU:s Miljölabb och praktikanten Ewa Krymarys för idéer, synpunkter, analyser och hjälp med genomförandet.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	3
Summary .....	3
Inledning och bakgrund .....	5
Bakgrund och problem.....	5
Kunskapsläget .....	5
Förväntad nytta .....	6
Genomförande .....	7
Resultat och diskussion.....	8
Materialval .....	8
Förändringar i materialet efter HTC .....	8
Faktorernas inflytande .....	9
Massbalans .....	12
Energibalans.....	15
Användningsmöjligheter för det behandlade materialet.....	15
Processvattenkvalitet .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Övriga tillämpningsområden för HTC.....	17
Livscykelanalys .....	18
Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg .....	19
Publikationslista.....	20
Projektkommunikation.....	20
Referenser .....	20
Bilagor .....	23

## Sammanfattning

Hydrotermisk karbonisering (HTC) är en behandling där ett fuktigt organiskt material utsätts för en kombination av värme och tryck, t ex 200°C och 20 bar. Då löses näringsämnen upp, och strukturen hos det organiska materialet förändras, vilket leder till att det stabiliseras, finfördelas, och enklare kan separeras från oorganiska delar.

HTC har tidigare mest använts vid bränsleproduktion, men i den här studien stod metodens potential för avgiftning och separation av avfall i fokus, och vilken roll HTC kan ha som avfallsbehandlingsmetod. Syftet med projektet var att bedöma potentialen av HTC som metod för att öka återvinningen av näringsämnen i en cirkulär ekonomi med samtidigt förbättrad avgiftning av avfall jämfört med biologisk behandling, och minskade utsläpp av koldioxid genom annan användning av organiska avfall än som bränsle.

För att uppnå målen genomfördes labbförsök med efterföljande kemiska analyser, och resultaten låg till grund för en multivariat dataanalys och en livscykelanalys.

Resultaten visar på en avgiftning genom en separation av halten av skadliga tungmetaller, och att värmevärdet ökar. Dock så bedöms det analyserade materialet inte kunna användas till jordförbättringsmedel eller som anläggningsmaterial, vilket dock främst beror på att materialet redan var förorenat.

HTC lämpar sig bäst för blöta avfall med en blandning av organiska och oorganiska delar. En marknadsanalys visar på att 100 000-tals ton av dessa typer av avfall faller varje år.

Sammanfattningsvis så kan processen vara intressant som avfallshanteringsmetod, men mer forskning behövs gällande mekaniska egenskaper och mekanisk separation.

## Summary

Hydrothermal carbonization (HTC) is a treatment where an organic material is subjected to a combination of heat and pressure, for example 200°C and 20 bars. Then nutrients are dissolved and the structure of the material is changed, leading to a stabilization and comminution, and making it easier to separate from the inorganic materials.

Previously HTC has been used mostly for fuel production, but in this study the potential for detoxification and separation of wastes is in focus, and what role HTC can play as a waste management method. The purpose is to judge the potential of HTC as a method to increase recycling of nutrients in a circular economy with a simultaneous increased detoxification compared to biological treatment, and less emissions of carbon dioxide through other uses of organic materials than as fuel.

To achieve these goals a lab experiment was done with subsequent chemical analyses, and the results provided a basis for a multivariate data analysis and a life cycle assessment (LCA). The results shows a detoxification through a separation of the amounts of hazardous heavy metals and that there is an increase in heating value. However, the processed material cannot be used as a soil improver or as a construction material, but this is due to the fact that it was already contaminated.

HTC is most suitable for wet, organic, mixed wastes. A market analysis shows that 100 000's of tons of these wastes are produced every year in Sweden.

To sum up, the process can be interesting as a waste management method, however more research is needed on the mechanical properties and separation of the material.



Figur 1 Finfraktion från bygg- och rivningsavfall som testades i detta projekt och exempel på hur materialet såg ut efter HTC-behandlingen: ljusare efter HTC vid 180°C och nästan svart efter HTC vid 260°C

## Inledning och bakgrund

### Bakgrund och problem

Dagens hantering av organiskt avfall i Sverige består främst av termisk och till en mindre del av biologisk behandling. Oorganiskt avfall som inte kan återvinnas läggs på avfallsupplag. I förbränningsprocessen oxideras det organiska materialet medan inorganiska komponenter och näringsämnen blandas i högkoncentrerade askor. Biologiska processer kan många gånger inte bryta ner komplexa organiska föreningar, vilket innebär att näringsämnen och humus inte heller kan återföras i kretsloppet.

Ett växande problem är blandade avfall från diverse behandlings- och återvinningsprocesser som innehåller en del organiskt material men som lämpar sig för varken biologisk behandling eller förbränning.

Hydrotermisk karbonisering är i dagsläget ingen etablerad avfallsbehandlingsmetod. Utvecklingsarbeten pågår i flera länder, dock oftast med inriktning mot behandling av homogena avfallsmaterial, t ex olika typer av jordbruksavfall eller slam.

I detta projekt utreds möjligheten att använda HTC som led i en separation av organiskt och oorganiskt material och för behandling av blandade avfallsströmmar med målet att bedöma potentialen för möjliga tillämpningar av HTC-tekniken för avfallsbehandling.

### Kunskapsläget

Hydrotermisk karbonisering är en metod där organiskt material värms upp i vattenlösning eller i fuktigt tillstånd (Li, Hale et al. 2014) till subkritiska temperaturer, normalt 180-260 grader under autogent tryck (Kambo, Dutta 2015). Det organiska materialet börjar brytas ner och mikrometerstora kol-liknande partiklar bildas (Funke, Ziegler 2010). Näringsämnen frigörs till vattenfasen (Toufiq Reza, Freitas et al. 2016), och organiska föreningar förstörs (vom Eyser, Palmu et al. 2015). Det kvarvarande "bio-kolet" är hydrofobt och kan enkelt avvattnas mekaniskt (Benavente, Calabuig et al. 2015, Hitzl, Corma et al. 2015).

HTC-processen påverkar alltså avfallet på flera sätt: det homogeniseras, det hygieniseras, och en separation av de nerbrutna och ej nerbrutna delarna förenklas.

Tidigare studier har ofta fokuserat på energiaspekten, t.ex. Li, Diederick et al. (2013) för emballerat hushållsavfall (Zhao, Shen et al. 2014) eller avloppsslam, medan tillämpningarna inom återvinning och behandling av blandade avfall ännu delvis är outforskade. I en forskningsartikel publicerad i maj 2017 (Mu'min, Prawisudha et al. 2017) visas möjligheten att använda HTC för att separera plast och aluminium från organiskt material.

Ur ett systemperspektiv skulle HTC kunna bidra till en hållbar utveckling på flera sätt, såsom ökad återvinning av näringsämnen som en del i en cirkulär ekonomi, avgiftning

av avfall med organiska föroreningar, och minskad förbränning med efterföljande koldioxidutsläpp.

Då HTC är en blöt process, lämpar den sig väl – och har hittills undersökts främst – för avfall med hög fukthalt, exempelvis:

- Blandat matavfall, t.ex. restaurangavfall
- Animaliskt avfall, t.ex., slaktavfall, pälsfarmsavfall
- Avloppsslam, som efterbehandling (Lilliestråle, Björkman 2016), delsteg före förgasning (Gai, Chen et al. 2016) eller utvinning av fosfor (Sirén 2016)
- Hushållsavfall (Reinhart, Bolyard et al. 2016)
- Andra blöta och blandade avfall med organiskt innehåll, som förbehandling, delsteg eller enda process.

Även som förbehandling inför nedbrytning av mer stabila föroreningar har HTC visat en potential, t ex beträffande siloxaner (Ravenelle, Schübler et al. 2010) och PFOS (Merino, Qu et al. 2016).

### Förväntad nytta

HTC skulle alltså kunna vara ett komplement till förbränning och biologisk behandling, till exempel för avfall med hög fukt- och askhalt som är olämplig för förbränning, till blandade avfall där biologisk behandling skulle ta lång tid och vara oekonomiskt eller till organiskt avfall som innehåller svårnedbrytbara organiska föroreningar men även näringsämnen som man vill återvinna.

Denna förstudie förväntas i samband med efterföljande innovations- och ev. demonstrationsprojekt kunna leda till följande effekter:

- Minskade kostnader och energianvändning för avfallshantering om man använder spillvärme för HTC-processen för att framställa en produkt som har mindre vikt, högre brännvärde och förbättrade avvattningssegenskaper.
- Ökad återvinning av näringsämnen genom t ex att kväve går i vattenlösning istället för att oxideras i en förbränningsprocess.
- Förbättrad avgiftning av avfall genom att organiska föroreningar destrueras.
- Ökad återvinning av material genom att de inte förbränns. Metaller kan återvinnas till högre grad om de inte oxideras i en förbränningsprocess.
- Attraktiva energiprodukter i form av ett homogent och kol-liknande material med god lagringsbarhet.
- Minskade utsläpp av koldioxid om det bildade material kan likt biokol användas som jordförbättringsmedel istället för att det förbränns.

## Genomförande

Projektet genomfördes av forskargruppen Avfallsteknik på LTU. Lale Andreas var projektledare och Erik Marklund utförande tillsammans med Ewa Krymarys. Analyser utfördes av Avfallstekniks labbtekniker och ALS AB.

Kunskapsfronten inventerades genom litteraturstudier och kontakter med kollegor på företag (RGS Nordic, Dåva DAC), universitet (UmU, Aalto University, University of South Carolina) och på internationella konferenser (HTC2017, Sardinia2017).

Kartläggningen av avfallsströmmar liksom en analys av möjliga applikationer i det svenska avfallshanteringssystemet gjordes i samarbete med Anders Lindström vid RGS Nordic.

Laboratorieförsöken utfördes med den lätta delen av finfraktionen från återvinningen av bygg- och rivningsavfall som hade identifierats som ett lämpligt material att testa.

HTC experimenten planerades med ett program för experimentell design (Modde, Umetrics AB 2015) och genomfördes i en småskalig högtrycksreaktor (high pressure batch reactor, HPBR, nyttovolym 0.2 liter). Avfallet siktades till 1-10 mm och en del av detta material finmalades. HTC-försöken genomfördes med dessa båda fraktioner samt en blandning ("Mix"). Utöver partikelstorleken varierades temperaturen (180, 220, 260°C) och kvoten mellan vatten och fastmaterial (L/S-kvot; 4, 7, 10). Upplägget med att testa ett antal faktorer vid olika nivåer valdes för att hitta lämpliga kombinationer för behandlingen beroende på målet man vill uppnå, t ex få fram ett mera högvärdigt bränsle, koncentrera föroreningar eller näringsämnen i vatten- respektive fastfas, eller att förbättra materialets avvattnings- eller separationsegenskaper.

Provberedningen, genomförandet och materialegenskaperna beskrivs i Bilaga 1 (Methods and results).

Efter HTC experimentet analyserades massbalansen och innehåll i både fastmaterial och vätskefas. Gasfasen kunde tyvärr inte mätas i utrustningen som användes. Det fasta materialet analyserades med avseende på glödförlust respektive askhalt, kolhalt (TC, TOC, IC) och koncentrationer av huvud- och spårelement. Vätskefasen analyserades för pH, elektrisk ledningsförmåga (electric conductivity EC), TOC liksom huvud- och spårelement.

Analysresultaten screenades medels multivariat dataanalys (Simca) för att upptäcka generella mönster eller cluster i resultaten beroende på faktorernas inverkan. Sammanhang mellan enskilda variabler och observationer visas i bivariata diagram och tabeller.

Massbalansen låg till grund för en livscykelanalys (LCA) där miljöeffekterna av att använda HTC som förbehandling innan avfallsförbränning analyserades. Även en enklare energibalans upprättades.



## Resultat och diskussion

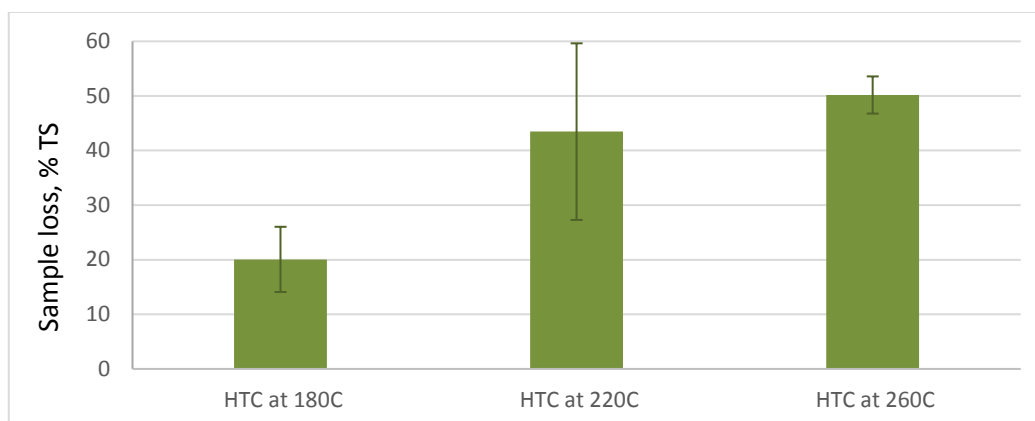
### Materialval

Bygg- och rivningsavfall faller i stora mängder i Sverige (ca 1,7 Mton/år). Vid återvinning siktas materialet (ofta vid 40 mm) varvid den grova fraktionen sorteras och återvinns medan finfraktionen skickas till förbränning. Finfraktion utgör upp till 50 % av bygg- och rivningsavfallet. Den anses vara ett dåligt bränsle trots relativt högt innehåll av trä och plast, på grund av att den också innehåller mineraliskt material, gips och en del metaller. HTC ses som en möjlig metod att förbättra bränsleegenskaperna.

### Förändringar i materialet efter HTC

Avfallet påverkas genom HTC-behandlingen, och förändringarna är i de flesta fall tydligare efter den intensivare behandlingen vid högre temperaturer (se faktorernas inflytande nedan).

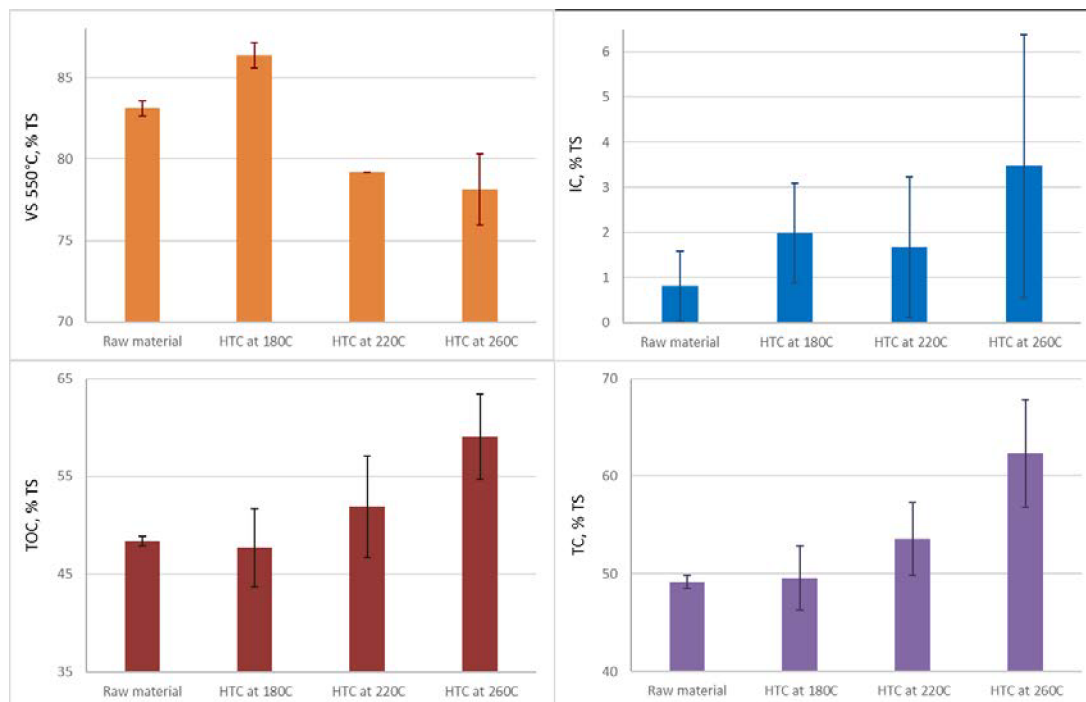
Alla faktorkombinationer ledde till en minskning av mängden material som i genomsnitt var 20 % vid 180°C och 50 % vid 260°C (Figur 1). Minskningen sker genom nedbrytning, omvandling och förflyktigande av organiskt material.



Figur 2 Minskning av torrsubstans genom HTC-behandling vid olika temperaturer (torrvikt före delad med torrvikt efter behandling i %)

Materialets glödförlust ökade vid 180°C men minskade vid de högre temperaturerna, samtidigt som halten totalt och organiskt kol (TC och TOC) i medel inte påverkades vid 180°C men ökade vid 220 och 260°C (Figur 2). Detta hänger ihop med förlusten av torrsubstans och belysas närmare under punkten Massbalans längre ner. Ökningen av organiskt kol gör att bränsleegenskaperna av materialet förbättras, och har man det som mål, är behandlingar vid höga temperaturer att föredra.

Även halten oorganiskt kol (IC) ökade i genomsnitt efter alla behandlingar, dock med så stora variationer att ökningen inte kan anses vara statistiskt säkerställd.



Figur 3 Förändringar av glödförlust (VS), totalt, organiskt och oorganiskt kol (TC, TOC, IC) genom HTC-behandling vid olika temperaturer

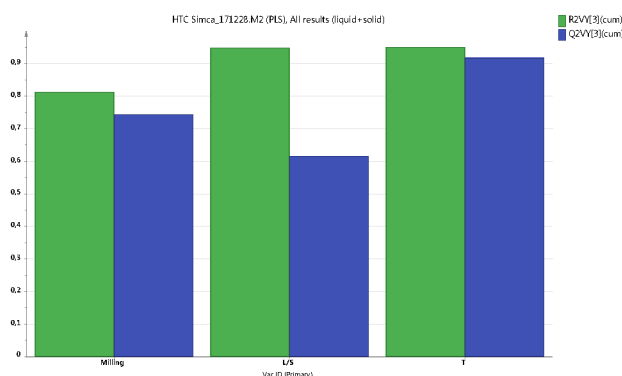
Kopplat till förlusten av torrsubstans är också koncentrationerna för de flesta huvud- och spårelement högre i det behandlade materialet; relaterat till ingående TS är dock koncentrationerna i de flesta fall oförändrade eller något mindre.

### Faktorernas inflytande

Olika materialegenskaper påverkas i olika grad av försöksparametrarna. Figur 3 visar till vilken grad faktorernas inverkan förklaras av datavariationen i en multivariat utvärdering (PLS – partial least squares modellering). Detta kan tolkas som hur mycket faktorerna bidrar till att resultaten ser ut som de gör.

Temperaturen T har den största effekten, men eftersom vid de högsta temperaturerna också trycket i reaktor var högst (Tabell 3 i Bilaga 1), går det inte att utesluta att effekterna som vi ser för T åtminstone delvis beror på trycket.

Inverkan av L/S-kvoten är nästan lika högt som temperaturens, vilket betyder att även fukthalten i materialet påverkar egenskaperna av materialet och vätskefasen efter HTC-behandlingen. Partikelstorlekens effekt är minst.



Figur 4 Förklaringsgrad för faktorerna temperatur (T), L/S-kvot och partikelstorlek (Milling) i multivariat PLS (partial least squares) analys av samtliga resultat (observationer från själva testen och analysresultat för både vätske- och fastfas).

En överblick över *hur* faktorerna påverkar ger Figur 4. I det övre diagrammet (scoreplot) ser man tydliga grupperingar av proverna beroende på temperaturen i HTC processen och undergrupper för L/S-kvoten. Scoreplot och loadingplot (nedanför) är komplementära och tolkas tillsammans.

Proverna som kördes vid 260°C ligger i vänstra delen av scoreplotten samtidigt som faktor T och alla mätvärden som är ”högare” i dessa prover (dvs. relativt sett högre än i andra prover), ligger på vänstra sidan i loadingplotten. pH i vätskefasen är lägre efter HTC vid 260 eller 220°C än vid 180°C och finns på höger sida i loadingplotten. De låga pH-värdena efter behandling i högre temperaturer förklaras med en intensivare hydrolys under högre temperatur och tryck och en högre rörlighet av protonerna.

En högre behandlingstemperatur leder alltså både till intensivare nedbrytning och utlakning av materialet och till högre koncentrationer i det kvarvarande materialet på grund av förlusten av torrsubstans.

I vertikal riktning finns faktorn L/S och därmed också proverna som kördes vid hög L/S-kvot i övre delen av båda diagrammen. Korrelationerna är inte lika tydliga som för temperaturen men tendensiellt föreligger ämnena i den övre halvan av loadingplotten i högre koncentrationer i fast eller vätskefas efter HTC-behandling vid hög L/S-kvot medan glödförlust (VS), oorganiskt kol och ämnena i nedre diagramhalvan har lägre koncentrationer efter behandlingen.

”Milling” som står för variationen i partikelstorleken finns närmast centrum (origo) i loadingplotten vilket betyder att effekten på resultaten är liten.

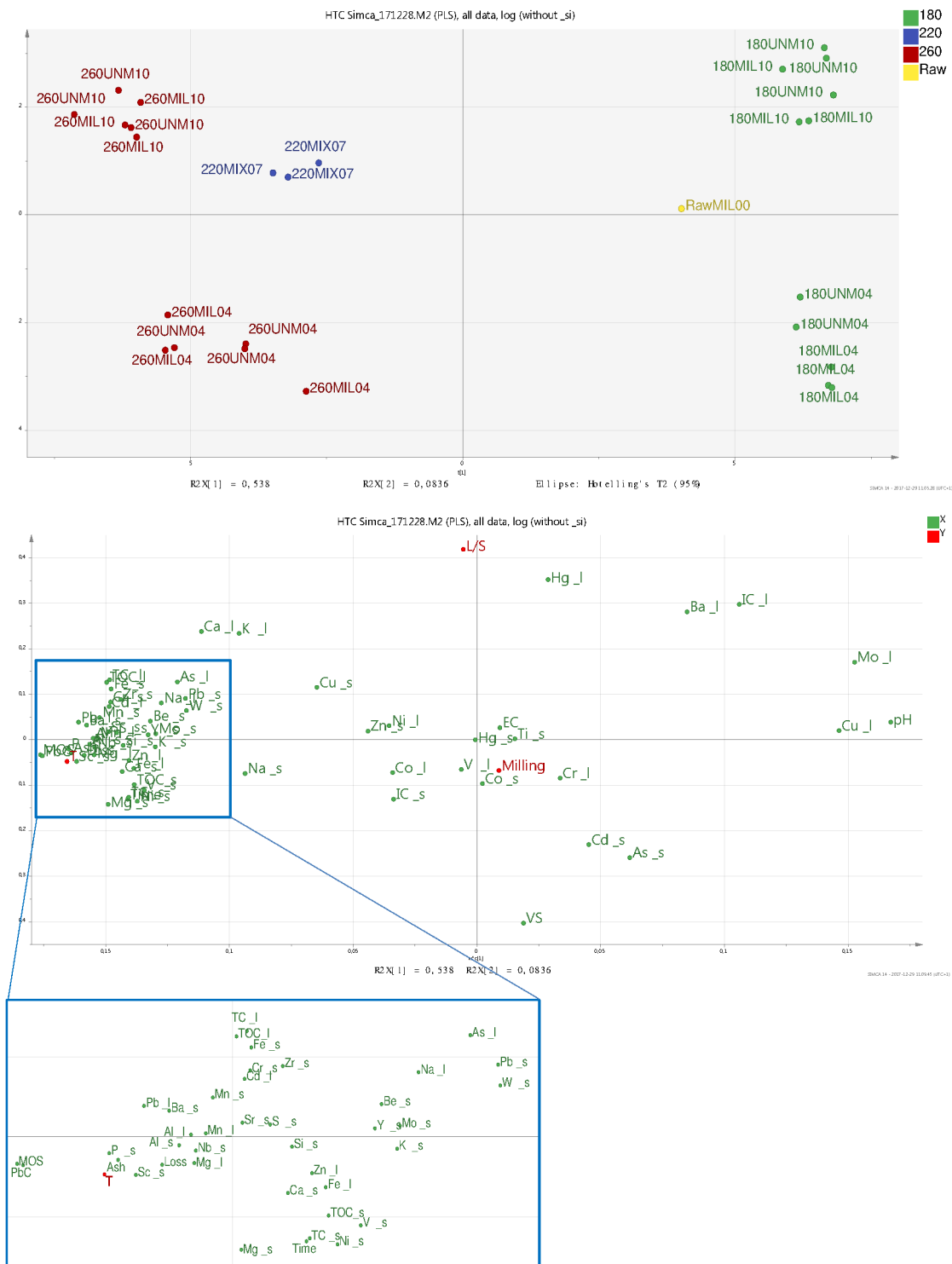
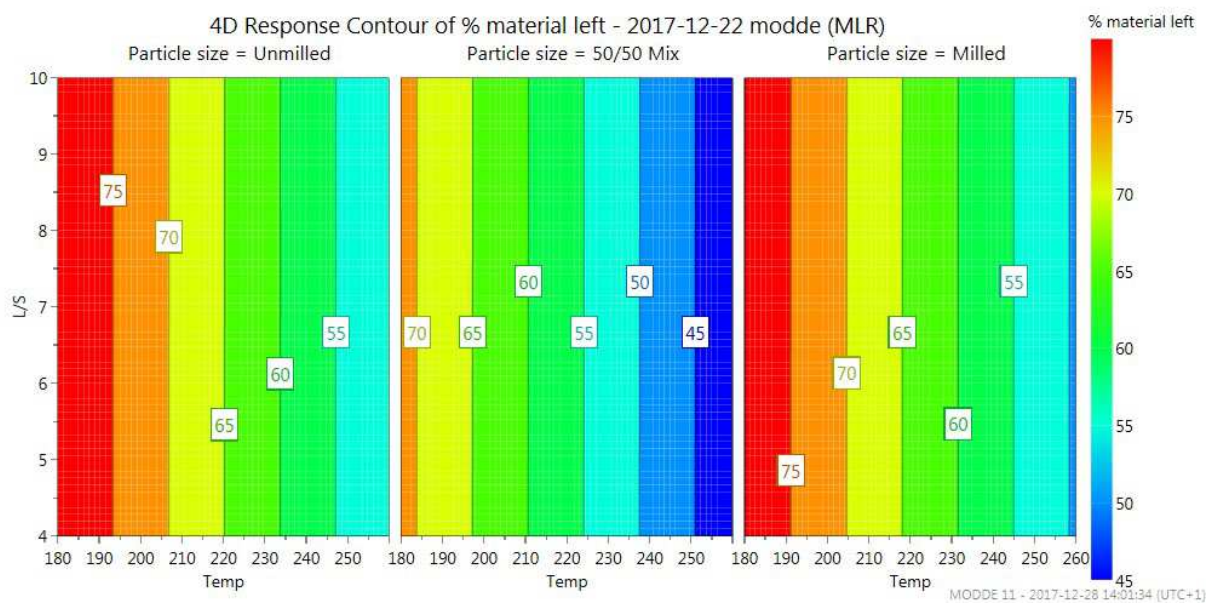


Figure 5 Scoreplot (ovan; prover) och loadingplot (mitten och detalj nedan; faktorer och variabler) för PLS analys av samtliga resultat, dvs. observationer från själva testen och analysresultat för både vätskefas (ämne\_l) och fastfas (ämne\_s).

## Massbalans

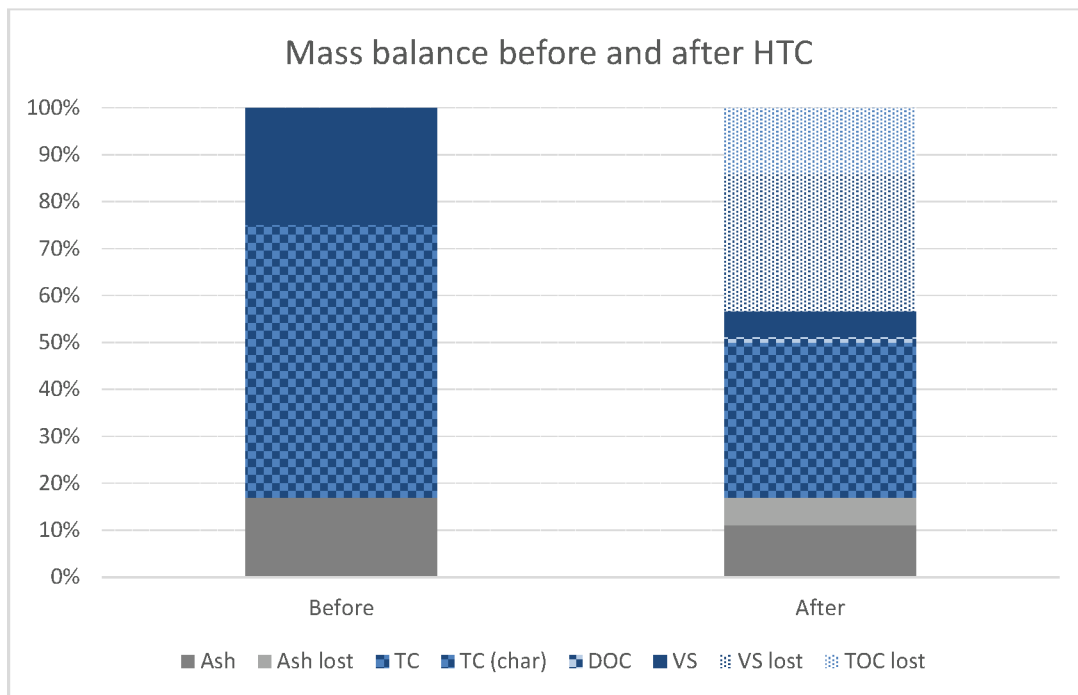
När avfall behandlats med HTC väger det kvarvarande materialet mindre än det ingående (räknat på torrsubstans). Vikten minskar med mellan ca 20 och 60% genom HTC-behandling, Figur 6. Temperaturen är den enda faktorn som har någon signifikant påverkan på detta, vilket kan ses på de lodräta konturlinjerna i figuren.



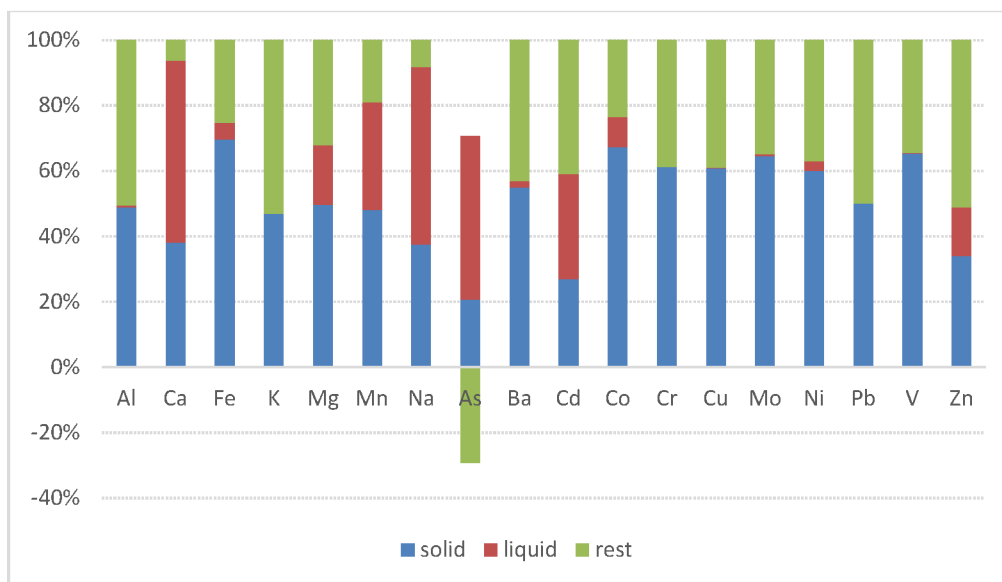
Figur 6 Konturplot över hur temperatur, L/S-kvot och partikelstorlek påverkar hur stor andel av materialet (talen i de vita rutorna, i %) som är kvar i fastfas efter att ha behandlats med HTC.

Fler detaljer gällande materialets fördelning mellan organiskt och oorganiskt visas i Figur 7. Värt att notera är den stora förlusten av aska, med ett tapp på 35% vid 260°C. I vätskefasen uppgick den totala koncentrationen av samtliga analyserade lösta ämnen till mellan 250 och 3700 mg/liter, vilket motsvarar enbart 2-16% av askförlusten. Var resterande 80% förlorad aska tar vägen är i dagsläget oklart.

Metaller och HTC har undersökts i åtminstone två tidigare artiklar (Smith, Singh et al. 2016, Reza, Lynam et al. 2013), men i båda fallen har vattenfasen ej analyserats. En analys av gasfasen hade givit ytterligare insikter, men är tekniskt svår att genomföra på grund av de höga trycken. Gällande det organiska innehållet så ökar kolets andel av glödförlusten efter behandlingen vid höga temperaturer, vilket visas i Figur 7, men minskar något vid lägre temperaturer. Denna relativa ökning av kol bidrar även till det högre värmevärdet vid högre temperaturer (se Energibalans).



Figur 7 Fördelningen av organiska och oorganiska delar före och efter HTC, där det organiska är blått, och askan är i grått. Diagrammet visar medelvärden för körningarna med 260°C, malet material, och L/S 4. Med "lost" avses att dessa inte uppmäts i vattnet eller i fastfasen.



Figur 8 Fördelningen av element efter HTC av malet material vid 260°C och L/S 10.



Figur 9 Fördelningen av element efter HTC av omalet material vid 180°C och L/S 4.

Figur 8 och Figur 9 visar att summan av element i vattenfasen och i utgående materialet blir mindre än 100% av ingående element. Vad detta beror på är i dagsläget oklart och bör undersökas vidare. En förklaring för en mindre del av "svinnet" skulle kunna vara att en del ämnen har adsorberats på större molekyler som sedan fastnat i filtret.

Koncentrationerna i det fasta materialet efter HTC-behandlingen är jämförbara med tidigare forskning (Reza et al. 2013, Smith et al. 2016), men koncentrationerna i vattenfasen saknar relevanta jämförelsevärden i litteraturen. Dock ligger värdena i vattenlösningen på rimliga nivåer, så något uppenbart fel kan inte utläsas.

Gällande arsenik så är massbalansen större än 100% i 22 av 26 fall, något som även kan ses i figurerna ovan. (Att diagrammet påvisar negativa värden är för att "resten" blir negativ då totalsumman för de övriga överstiger 100%). För lägre temperaturer är totalhalten av As större i den fasta fasen, och för högre temperaturer i vätskefasen. Varför just arsenik betar sig på det viset och vad som ligger bakom resultaten är en fråga för vidare studier.

Att betydande andelar av tungmetaller och övriga element mobiliseras efter HTC innebär att vikt bör läggas vid utformandet av behandlingsprocesser så att dessa hanteras på ett säkert sätt. Avloppsreningsverk är idag i huvudsak utformade för att hantera organiska föroreningar, vilket gör att dessa kan ha problem att hantera högre halter tungmetaller, vilket gör HTC-processvattnet mindre lämpligt att släppa ut i det kommunala avloppsnätet.

## Energibalans

Kunskapsläget gällande energibalansen för HTC-processer är relativt gott med många publicerade artiklar i ämnet, t.ex. Mäkelä, Yoshikawa (2016) eller Benavente, Calabuig et al. (2015). Samtliga studier visar på fördelar med HTC, i synnerhet om ett systemperspektiv intas, där energi för efterföljande avvattning/torkning inkluderas.

Den här undersökta finfraktion från bygg- och rivningsavfall har ett värmevärde på ca 14 MJ/kg TS. Efter HTC-behandlingen ligger värmevärde mellan ca 16 och 23 MJ/kg TS. Det antas att det krävs ca 209 till 302 kWh/ton (0,75-1,09 MJ/kg) för själva HTC-processen (se bilaga 1). Eftersom HTC innebär en massförlust på i genomsnitt 14-57%, kommer energin från utgående material bara vara 9.5-15.1 MJ/kg TS av inkommande material, dvs. vi får en negativ energibalans. Trots detta kan HTC-processen vara en bra förbehandlingsmetod om man förutom förbättrade torknings och avvattningsegenskaper även räknar in de förbättrade askegenskaperna (Reza, Lynam et al. 2013) som man får genom lägre koncentrationer av t.ex. Si, Ca och K i utgående material (givet att processen körs vid 180°C) (se Massbalans).

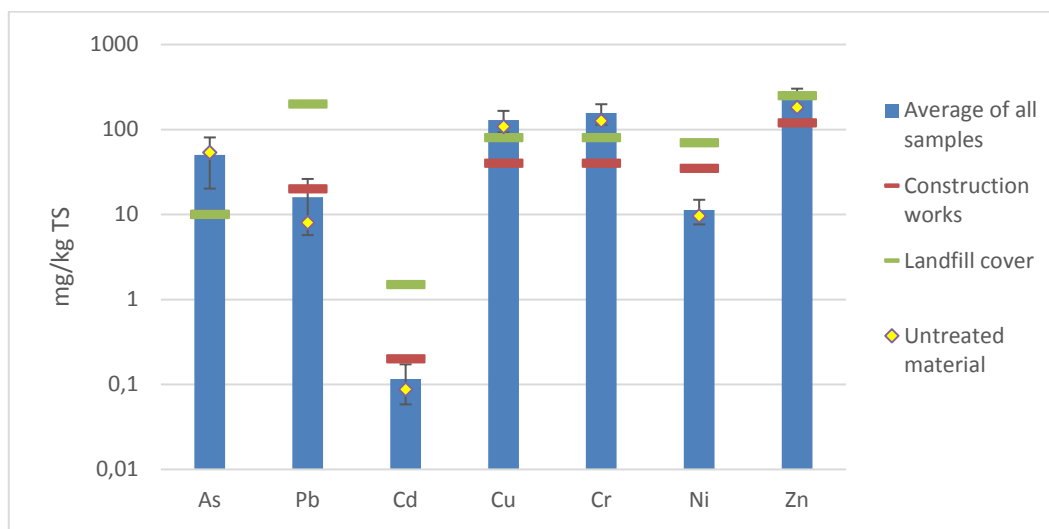
## Användningsmöjligheter för det behandlade materialet

Som ovan beskrivet förbättras energivärdet av det behandlade bygg- och rivningsavfallet så att det kan fungera som bränsle. Några ytterligare tänkbara användningsområden beskrivs i det här kapitlet.

### *Användning i bygg eller anläggning*

Ibland används byggavfall som konstruktionsmaterial i anläggningsarbeten. Halterna av några ämnen i både det obehandlade och det behandlade materialet har därför jämförts med Naturvårdsverkets riktlinjer för användning av avfall för anläggningsändamål (NFS 2010) för två olika tillämpningar. Som Figur 6 visar kan materialet inte användas för anläggningsändamål utan vidare provning, varken före eller efter HTC.





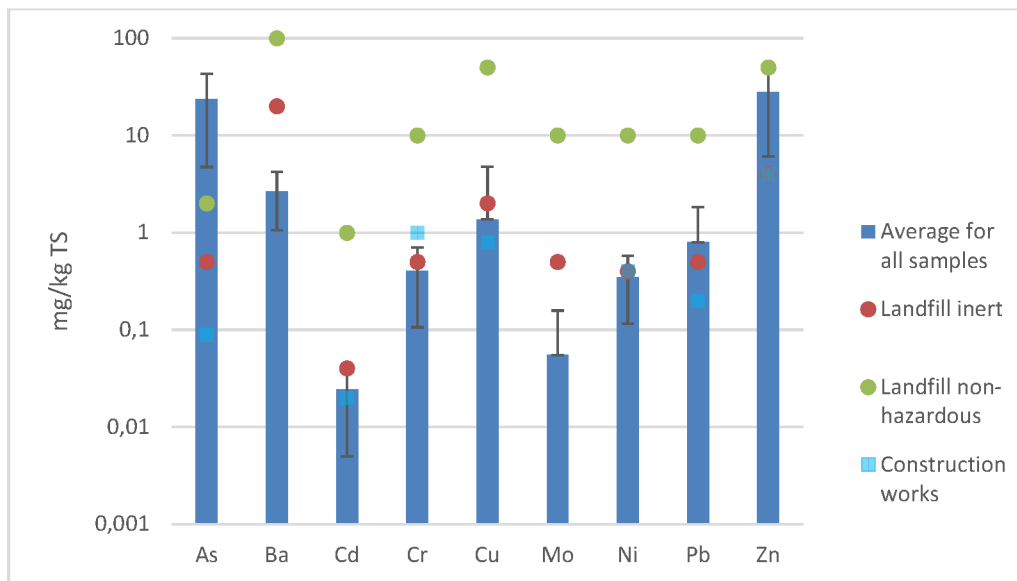
Figur 10 Genomsnittlig totalhalt i det testade materialet före och efter HTC-behandling jämfört med Naturvårdsverkets riktlinjer för användning av avfall i anläggningsarbeten (NFS 2010)

I HTC-processen går en del ämnen i lösning i processvattnet. Figur 11 visar genomsnittliga halter av utvalda spårämnen i processvattnet efter HTC-processen relaterade till ingående torrvekt av proverna. Halterna har jämförts med acceptanskriterier för mottagning av en deponi för inert avfall och igen med Naturvårdsverkets riktlinjer för användning av avfall för anläggningsändamål (NFS 2010).

Trots de relativt höga totalhalterna (Figur 10) innehåller vattnet låga mängder lösta element. För en användning som konstruktionsmaterial är dock fortfarande mobiliteten av flera ämnen för hög.

Tittar man på deponering som alternativ kan man konstatera att de flesta katjoner föreligger i lägre koncentration än acceptanskriterierna för deponering utom As och Zn. Med tanke på innehållet av metaller i materialet efter HTC (Figur 9) och processförhållandena med hög temperatur och högt tryck, är halterna dock lägre än förväntat. Den stora skillnaden mellan anjoner och katjoner kan bero på adsorption på negativt laddat löst organiskt kol, men här behövs mer forskning för att ge tydliga svar.

Vid jämförelsen med de valda gräns- och riktvärdena får man komma ihåg att utlakningen i HTC-processen är mycket intensivare än vid ett vanligt lakttest och koncentrationerna därför antagligen är högre för de flesta ämnen än vad man skulle kunna förvänta sig i ett standardlakttest.



Figur 11 Genomsnittliga halter av element i processvattnet (relaterat till ingående torrsubstans) vid HTC-behandlingen.

#### Övriga tillämpningsområden för HTC

Att behandla ett torrt avfall med HTC innebär en negativ energibalans (se avsnittet Energibalans). De förbättrade torknings- och avvattningsegenskaperna (Benavente, Calabuig et al. 2015) för HTC-behandlade material är en viktig faktor för en positiv energibalans, vilket gör att HTC lämpar sig bäst för blöta avfall.

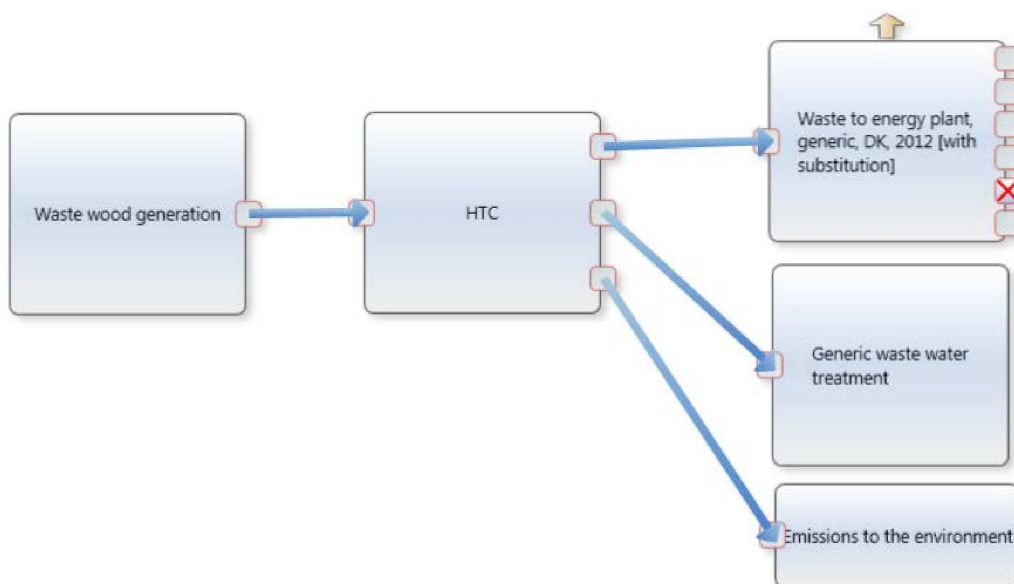
Ett exempel på avfall som skulle kunna vara lämpliga är avfall från butiker och restauranger. De totala mängderna matavfall uppgår till storleksordningen 100 000-tals ton (Naturvårdsverket 2016), därtill tillkommer övrigt restavfall från verksamheten. T.ex. snabbmatsrestaurangavfall är ofta en blandning av plast men kan även antas ha höga kloridhalter. Plast påverkas mycket mindre av HTC än organiskt avfall (Mu'min, Prawisudha et al. 2017), och kan därför enkelt mekaniskt separeras, och halterna av t.ex. natrium minskas, men även klor (Reza, Lynam et al. 2013). Även förpackat matavfall skulle kunna behandlas med liknande fördelar.

Ett annat möjligt användningsområde är avlivade djur som idag måste destrueras. Det kan handla om värphöns från äggproducenter, eller avlivade hästar. Mängderna här är relativt små, för värphöns handlar det om i storleksordningen ett par 1000 ton per år, men kostnaderna är ofta betydande, med få destruktionsanläggningar och långa transporter. En kostnad på 4-5 kr per kilo avfall för en äggproducent i Norrland är normalt. HTC bedöms vara en lämplig process då eventuella läkemedelsrester förstörs (vom Eyser, Palmu et al. 2015), avfallet hygieniseras och näringsämnen går i vattenlösning och kan återanvändas. Dock krävs mer forskning för att bedöma rimligheten för detta tillämpningsområde.

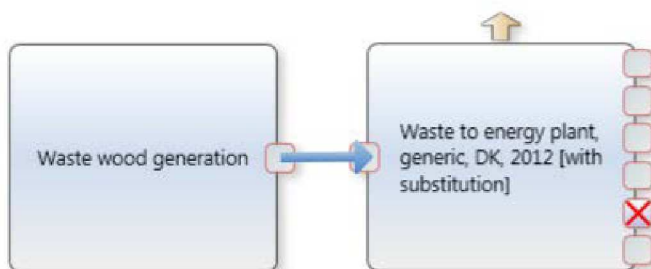
Användning av biokol producerat med HTC som jordförbättringsmedel har visat sig ha positiva effekter för grodd och för maskar (Rillig, Wagner et al. 2010, Melo, Bottlinger et al. 2017). Fortsatt forskning får visa om också avfall som traditionellt inte har någon tillämpning som jordförbättring kan användas till detta ändamål efter HTC-behandling.

### Livscykelanalys

En livscykelanalys (LCA) av HTC som förbehandlingsmetod innan avfallsförbränning har genomförts. Den modellerade processen visas i Figur 12 och Figur 13. Data finns i bilaga 1. Antaganden som gjordes är att HTC processen drivs med elektricitet, och att det krävs 200 kWh/ton för behandla avfallet.



Figur 12 Modell över användning av HTC som förbehandlingsmetod innan avfallsförbränning



Figur 13 Referensmodell utan HTC

Resultaten visas i Tabell 1. I samtliga fall förutom gällande övergödning står produktionen av elektricitet för majoriteten (73 till 100%) av miljöpåverkan i HTC-processen. I fallet övergödning bidrar vattenreningen till 60% av miljöeffekterna.

En slutsats av livscykelanalysen är att valet av energiförsörjningen till HTC-processen är av kritisk betydelse. Att använda t.ex. spillvärme från avfallsförbränningsanläggningen skulle med all sannolikhet ge kraftigt ändrade resultat.

Tabell 1 Skillnader mellan miljöeffekter med och utan HTC som förbehandling. En ökning innebär att miljöeffekterna ökar när HTC används som förbehandling.

Miljöeffekt	Ökning (negativa värden innebär minskning)
Climate change	137%
Ozone depletion	1856%
Human toxicity, cancer effects	-85%
Human toxicity, non-cancer effects	-99%
Particulate matter	222%
Ionising radiation human health	3903%
Photochemical ozone formation	-11%
Terrestrial acidification, Accumulated Exceedance	32%
Eutrophication Terrestrial, Accumulated Exceedance	-14%
Eutrophication Freshwater	102%
Eutrophication Marine	-13%
Ecotoxicity freshwater	74%

## Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Vid utformningen av HTC-baserade behandlingssystem så bör ett systemperspektiv intas, där samtliga effekter tas i beaktande. Då en väsentlig del av de inorganiska ämnena går i vattenlösning så krävs en genomtänkt hantering av processvattnet. Vidare visar livscykelanalysen på vikten av energiförsörjningen till processen. Att använda spillvärme bedöms vara en bättre lösning än att använda elektricitet för uppvärmningen.

Behandling av denna typ av avfall som här prövats innebär alltså att en mindre mängd avfall med högre värmevärde och bättre förbränningsegenskaper erhålls. Detta innebär i praktiken att en avfallsentreprenör skulle kunna ta betalt för mottagning av ett ton avfall, för att sedan bara behöva betala för att bli av med ett halvt ton. Till detta kommer kostnader för behandling och vattenrening, men HTC bör ändå vara en attraktiv process för avfallsentreprenörer.

Forskningsmässigt så kan ett lämpligt nästa steg vara att bygga vidare på forskningen gjord av (Mu'min, Prawisudha et al. 2017), och fortsätta undersöka möjligheten för mekanisk separation av t.ex. plast från HTC-behandlat avfall, samt även karaktärisera dess fysikaliska egenskaper. Även användningen av utseparerat material som jordförbättringsmedel kräver mer forskning.

## Publikationslista

Karaktären av projektet som en förstudie och den korta projekttiden gör att inga resultat har publicerats än.

En kort beskrivning av projektet finns på LTU:s hemsida. Resultaten från projektet kommer ligga till grund för en vetenskaplig artikel som planeras publiceras under 2018 i en vetenskaplig tidskrift.

## Projektkommunikation

En orientering skedde vid det första internationella symposiet om hydrotermisk karbonisering i London i våras. Den senaste kunskapen om HTC diskuterades med internationella kollegor och kontakter med svenska och internationella forskare knöts.

Vid det 16:e internationella avfallshanterings- och deponisymposiet på Sardinien diskuterades erfarenheter från projektet och möjligheter för framtida samarbeten med kollegor från hela världen.

Vid Re:Sourcedagen gavs tillfälle till mingel och kontaktskapande med kollegor inom avfallsbranschen, samt viss spridning av information om projektet.

På Green Norths höstmöte diskuterades HTC-metoden, användningsmöjligheter och framtida samarbeten, utvecklingsmöjligheter och gemensamma projekt med forskare från UmU, MTC Miljötekniskt Center och representanter från myndigheter, konsultföretag och avfallsbolag.

## Referenser

BENAVENTE, V., CALABUIG, E. and FULLANA, A., 2015. Upgrading of moist agro-industrial wastes by hydrothermal carbonization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, pp. 89-98.

FUNKE, A. and ZIEGLER, F., 2010. Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), pp. 160-177.

GAI, C., CHEN, M., LIU, T., PENG, N. and LIU, Z., 2016. Gasification characteristics of hydrochar and pyrochar derived from sewage sludge. *Energy*, 113, pp. 957-965.

HITZL, M., CORMA, A., POMARES, F. and RENZ, M., 2015. The hydrothermal carbonization (HTC) plant as a decentral biorefinery for wet biomass. *Catalysis Today*, 257(P2), pp. 154-159.

KAMBO, H.S. and DUTTA, A., 2015. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp. 359-378.

LI, L., DIEDERICK, R., FLORA, J.R.V. and BERGE, N.D., 2013. Hydrothermal carbonization of food waste and associated packaging materials for energy source generation. *Waste Management*, 33(11), pp. 2478-2492.

LILLIESTRÅLE and BJÖRKMAN, 2016. *Increased yield of biogas by post treatment of residual sludge*. REPORT 2016:312, Energiforsk – Swedish Energy Research Centre.

MELO, T.M., BOTTLINGER, M., SCHULZ, E., LEANDRO, W.M., DE AGUIAR FILHO, A M, OK, Y.S. and RINKLEBE, J., 2017. Effect of biosolid hydrochar on toxicity to earthworms and brine shrimp. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(6), pp. 1351-1364.

MERINO, N., QU, Y., DEEB, R.A., HAWLEY, E.L., HOFFMANN, M.R. and MAHENDRA, S., 2016. Degradation and Removal Methods for Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in Water. *Environmental Engineering Science*, 33(9), pp. 615-649.

MU'MIN, G.F., PRAWISUDHA, P., ZAINI, I.N., AZIZ, M. and PASEK, A.D., 2017. Municipal solid waste processing and separation employing wet torrefaction for alternative fuel production and aluminum reclamation. *Waste Management*, 67, pp. 106-120.

MÄKELÄ, M. and YOSHIKAWA, K., 2016. Simulating hydrothermal treatment of sludge within a pulp and paper mill. *Applied Energy*, 173, pp. 177-183.

NATURVÅRDSVERKET, 2016. Matavfall i Sverige, . Rapport 8765, Naturvårdsverket, Sverige.

NFS, 2004. Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall; Naturvårdsverkets författningssamling 2004:10.

NFS, 2010. Handbok 2010:1, Återvinning av avfall i anläggningsarbeten. Naturvårdsverkets författningssamling 2010:1.

RAVENELLE, R.M., SCHÜBLER, F., DAMICO, A., DANILINA, N., VAN BOKHOVEN, J.A., LERCHER, J.A., JONES, C.W. and SIEVERS, C., 2010. Stability of zeolites in hot liquid water. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(46), pp. 19582-19595.

REINHART, D., BOLYARD, S.C. and BERGE, N., 2016. Grand Challenges - Management of municipal solid waste. *Waste Management*, 49, pp. 1-2.

REZA, M.T., LYNAM, J.G., UDDIN, M.H. and CORONELLA, C.J., 2013. Hydrothermal carbonization: Fate of inorganics. *Biomass and Bioenergy*, 49, pp. 86-94.

RILLIG, M.C., WAGNER, M., SALEM, M., ANTUNES, P.M., GEORGE, C., RAMKE, H.-., TITIRICI, M.-. and ANTONIETTI, M., 2010. Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. *Applied Soil Ecology*, 45(3), pp. 238-242.

SIRÉN EHRNSTRÖM, M., 2016. Recovery of Phosphorus from HTC Converted Municipal Sewage Sludge, Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Master Thesis.

SMITH, A.M., SINGH, S. and ROSS, A.B., 2016. Fate of inorganic material during hydrothermal carbonisation of biomass: Influence of feedstock on combustion behaviour of hydrochar. *Fuel*, 169, pp. 135-145.

TOUFIQ REZA, M., FREITAS, A., YANG, X., HIIBEL, S., LIN, H. and CORONELLA, C.J., 2016. Hydrothermal carbonization (HTC) of cow manure: Carbon and nitrogen distributions in HTC products. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 35(4), pp. 1002-1011.

UMETRICS AB (2015). Program SIMCA. Version 14.0.0.1359, 2015, Jan 2015. Program MODDE Pro. Version 11.0.0.1717, May 2015.

VOM EYSER, C., PALMU, K., SCHMIDT, T.C. and TUERK, J., 2015. Pharmaceutical load in sewage sludge and biochar produced by hydrothermal carbonization. *Science of the Total Environment*, 537, pp. 180-186.

ZHAO, P., SHEN, Y., GE, S. and YOSHIKAWA, K., 2014. Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization. *Energy Conversion and Management*, 78, pp. 815-821.

## Bilagor

Bilaga 1      Methods and results