

RE:

SOURCE

Slutrapport för projekt

Ämnesöverskridande samverkansprojekt för nya biomaterial ur skogsindustriella restprodukter med biotekniska system i kaskad

Projektperiod: Juni – December 2017

Projektnummer: 44205-1

Med stöd från:



STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM

Titel på projektet – svenska Ämnesöverskridande samverkansprojekt för nya biomaterial ur skogsindustriella restprodukter med biotekniska system i kaskad
Titel på projektet – engelska Interdisciplinary cooperation project for new biomaterials from forest industry waste products with biotechnological systems in cascade.
Universitet/högskola/företag Karlstads Universitet
Adress Universitetsgatan 2, 651 88 Karlstad
Namn på projektledare Maria Sandberg
Namn på ev övriga projektdeltagare Simon Bengtsson, Alan Werker, Sudhanshu Pawar, Karin Willquist, Erik Coxman, Venkatesh Govindarajan, Tim Andersson.
Nyckelord: 5-7 st Massa- och pappersbruk, Bioslam, Polyhydroxyalkanoater (PHA), Biovätgas

Med stöd från:



**STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM**

Förord

Det här projektet har drivits med stöd av Innovationsprogrammet RE:Source som finansierats av Vinnova, Energimyndigheten och Formas och genomförts av Karlstads universitet, RISE Research institute of Sweden, Promiko AB och Paper Province ekonomiska förening. Personal från Billerud Korsnäs Gruvöns bruk, Stora Enso Skoghalls bruk, Rottneros bruk, NordicPaper Bäckhammars bruk och Pöyry AB har bidragit med insamlande av data och ovärderlig hjälp vid utvärdering av resultaten.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	6
Inledning och bakgrund	8
Variation inom skogsindustriell massa-, pappers- och reningsteknik	8
Biopolymerer i form av polyhydroxyalkanoater (PHA)	9
Produktion av flyktiga fettsyror och vätgas	11
Miljömässig utvärdering	12
Syfte och mål	13
Genomförande	14
Beräkningar kring processvattenreningen	16
Beräkningar kring produktion av PHA	17
Beräkningar kring produktion av VFA och biovätgas	18
Energiberäkningar	19
Miljömässig livscykelanalys (E-LCA)	20
Hållbarhetsanalys	21
Affärsanalys	21
Intäkter och kostnadsberäkningar	21
Aktörsanalys och konsortieavtal	21
Resultat och diskussion	22
Potential för produktion av vätgas och PHA från pappers- och massabruken	22
Bruk 1	25
Bruk 2	26
Bruk 3	28
Bruk 4	28
Livscykelanalys	28
Hållbarhetsanalys	30
Affärsanalys	31
Intäkter och kostnadsberäkningar	31
Aktörsanalys	33
Diskussion: Möjligheter och begränsningar för produktion av PHA och vätgas från skogsindustriella restströmmar	36
Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg	39
Publikationslista	40
Projektkommunikation	40
Referenser	42
Bilagor	45
Bilaga 1a. Hållbarhetsanalys	46
Bilaga 1b. Hållbarhetsanalys	47
Bilaga 2. Indata för LCA	48
Bilaga 3. Känslighetsanalys för affärsanalysen	49

Sammanfattning

För att nå målet att Sverige ska vara CO₂-neutralt före 2045 behöver vi ställa om mot en mer cirkulär bioekonomi som utgår från förnyelsebara råvaror för energi och material. I processavloppsvatten från massa- och pappersbruk finns organiska ämnen som skulle kunna omvandlas till produkter med högt värde i stället för att, som idag, brytas ner i reningsverket.

I detta projekt har en kaskadprocess utvärderats för produktion av biopolymerer av typen polyhydroxyalkanoater (PHA) och biovätgas ur skogsindustriella restflöden. PHA är eftertraktade som råvaror till nya nedbrytbara material med ett brett spann av tillämpningar. Vätgas är en värdefull energibärare som också förväntas få en ökad efterfrågan som reduktionsmedel. För att producera PHA används överskottsbioslam från brukets processvattenrening. Den andra råvaran är en delström från brukets processavlopp. Det krävs att organiskt material i procesströmmen först omvandlas till flyktiga fettsyror (VFA). Detta processteg kan drivas så att även vätgas produceras vilket bl.a. gynnas av en hög processtemperatur.

Det visade sig att det skulle vara möjligt att producera ansevärliga mängder PHA och vätgas från de skogsindustriella restströmmarna med den föreslagna kaskadprocessen. Uppskattningarna visade att potentialen för tre av de fyra brukena som studerades var, var för sig, 800 - 2000 ton/år PHA och 50 - 200 ton/år vätgas. Marknadsvärdet på dessa produkter är 40 - 100 miljoner SEK/år vid vart och ett av dessa tre bruk. En större affärsmässig potential kan finnas ifall synergi kan skapas mellan brukena kring dessa förnybara resurser.

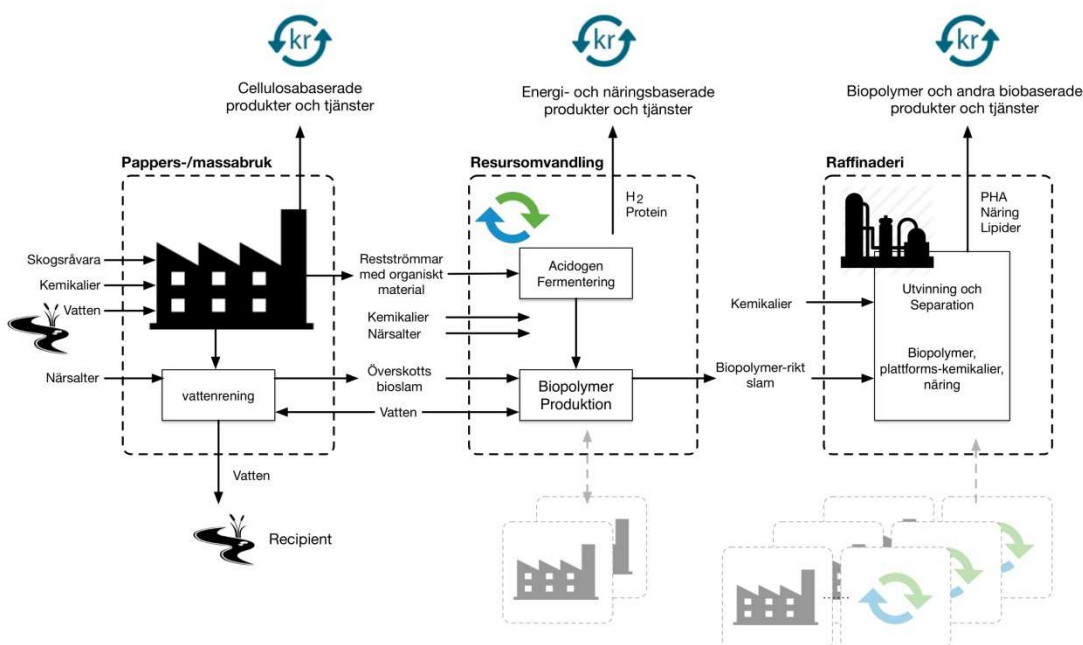
Implementering av kaskadprocessen skulle innebära minskad belastning på befintliga reningsverk. Det skulle generellt leda till mindre bioslamsproduktion, näringsbehov och elanvändning för luftning. Ett lämpligt sätt att påbörja en implementering vore att i första hand fokusera på PHA-produktion som är en relativt sett, mer mogen teknik, och på den omvandling av organiskt material till VFA som krävs för PHA-produktion. VFA-produktionen kan sedan efterhand optimeras mot samtidig vätgasproduktion.

Produktion av biovätgas vid termofila förhållanden (70°C) skulle medföra ett stort behov av tillsatt värme vilket förutser att det finns överskottsvärme tillgänglig vid bruket. Ett alternativ är att driva vätgasprocessen vid en lägre temperatur med en något lägre utbyte av vätgas som följd.

En förenklad livscykelanalys visade på miljömässiga fördelar med att omvandla organiskt material till PHA och vätgas eftersom utsläpp av CO₂-ekvivalenter skulle minska väsentligt. En stor del av detta beror på att PHA förväntas ersätta andra material som orsakar större utsläpp. Dock måste det beaktas att utvinning och förädling av PHA och vätgas nedströms kaskadprocessen förbrukar resurser med miljöpåverkan.

En implementering av kaskadprocessen skulle kunna möjliggöra en industriell symbios där en extern aktör tar hand om en delström från ett bruk och driver omvandlingen av rester till produkter. En synergi skapas då så att bruket åtnjuter avlastning på sin befintliga processvattenbehandling samtidigt som en ny verksamhet kan utvecklas och stimulera en regional cirkulär bioekonomi. Det finns många olika möjliga affärsrelationer mellan aktörer i samband med ett utbyte av råvaror och produktion av förnybara resurser. Kaskadprocessen skulle kunna vara ett sätt att utöka regionens bioekonomiska produktivitet.

Framtida undersökningar bör inkludera experimentella utvärderingar av delprocesserna för att bekräfta utbyten och antaganden samt utveckla optimala processtrategier. Under detta projekt har ytterligare ett antal aktörer knutits till projektgruppen och gemensamt åtagits sig att utveckla konceptet vidare mot ett framtida större utnyttjande av skogsindustriella restströmmar för nya produkter som bidrar till en cirkulär bioekonomi.



Ett möjligt upplägg för industriell symbios där kaskadprocessen hanteras av en aktör som skapar värdefulla produkter baserade på bland annat biopolymerer och vätgas från restströmmar från skogsbruken.

Summary

In order to reach the target of carbon-neutrality for Sweden before the year 2045, the journey forward needs to be characterised by an increase in the share of renewable resources in the total material and energy inputs into the national economy. The wastewater discharged by paper and pulp mills in Sweden is rich in organics which can, instead of being combusted for energy production, be transformed to high-value materials of relevance and significance in a circular bioeconomy.

In this project, the researchers have analysed a cascade process which results in the production of biopolymers of the polyhydroxyalkanoate (PHA) family and hydrogen gas, from wastewater of the provenance referred to above. PHAs are currently entrenching themselves in the global marketplace as biodegradable plastics with a swathe of applications in society and industry. Hydrogen is both an energy carrier and a reducing agent in the chemical reactions in the industry. PHA production utilizes the bio-sludge from the wastewater treatment step downstream of the mill, as well as a wastewater side-stream from one of the processes in the mill. The yield is dependent on the successful conversion of the organics in the waste-stream into volatile fatty acids (VFAs). This conversion can also yield hydrogen gas as an additional product from the cascade which is favoured by thermophilic conditions.

The research proved that it is possible to produce considerable quantities of PHA and hydrogen from the forest industry wastewater streams. For three of the four mills analysed, the estimated yields were between 800 and 2000 tons per year of PHA and between 50 and 200 tons per year of hydrogen gas. The market value of these products, on date, is between 40-100 million SEK per year, for each of the three mills. There is thus a clear synergy with the potential to yield economic and environmental benefits, which needs to be harnessed in the near future.

Among the advantages of implementing this cascade process in a paper and pulp mill, are the reduced loading on the existing wastewater treatment plant, lower sludge generation, reduction in the use of added nutrients (nitrogen and phosphorus), and a decrease in the use of electricity for aeration of the wastewater in the treatment plant. A practical approach would be to first focus on PHA production, which is a more mature technology, before adding on hydrogen gas production.

It has been assumed in the report that the heating needs for the production of hydrogen using thermophilic microorganisms at close to 70°C, can be easily fulfilled by recovering and utilizing the available waste heat within the premises of the paper and pulp mill. However, in the absence of enough heat for this purpose, the possibilities to carry out hydrogen production at a lower temperature should be evaluated. Potentially, the yield of hydrogen could be lower at lower temperature, but this may be an acceptable compromise.

A simplified environmental life-cycle analysis confirmed the environmental benefits – with regard to reduction in greenhouse gas emissions - of recovering PHA and hydrogen gas from the wastewater stream. Expanding the system to include The benefits are largely due to impacts avoided by the reduction in demand for other plastics which PHA would replace.

In this so-called 'cascade process', untapped synergies can be unearthed. New businesses can evolve, utilising the waste stream from existing businesses in the forestindustry. The latter thereby are able to offload some of their 'burden' – in this case the need to treat the wastewater before discharge – and the former can, while contributing to the circular bio-economy, establish themselves in the global marketplace, by virtue of new sustainable products suitable for the 21st century. Bio-economic productivity of regions can thus be enhanced over time. During this project, partners from academic research groups, universities and industry have committed to further develop the concept which can be commercialized and entrenched in the Swedish forest indutry. Future research will focus on experimental analysis and verification of the conversion yields and assumptions in the different processes, from the point of view of optimisation.

Inledning och bakgrund

För att nå ett hållbart samhälle och målet att Sverige ska vara CO₂-neutralt före 2045, behöver vi ställa om mot cirkulär bioekonomi som utgår från förnyelsebara råvaror för energi och material. Vi behöver förlänga kretslopp och omvandla restprodukter till nya värdefulla material. Även restprodukter som idag används som bränsle för energiåtervinning kan behöva omvärderas och förädlas till mer samhällsviktiga resurser.

Svensk skogsindustri använder förnyelsebara råvaror och ger förutsättningar för att skapa restprodukter som bidrar till en cirkulär bioekonomi. I processavlopp från massa- och pappersbruk finns värdefulla rester som kan upparbetas till produkter med högt värde i stället för att, som idag, brytas ner i reningsverket. Ett exempel är hemicellulosa. Även bioslam, en restprodukt från brukets reningsverk, kan upparbetas till nya värdefulla bioprodukter.

Bioslammet består av bakterier och andra mikroorganismer från reningsverket. En del av bakterierna har förmågan att ackumulera biopolymerer av typen polyhydroxyalkanoater (PHA). För att ackumulera PHA, behöver bakterierna utsättas för överskott av lättnedbrytbara organiska ämnen som kolkälla. Flyktiga fettsyror (VFA), som t.ex. ättiksyra, propionsyra och smörsyra kan användas som kolkälla. Biopolymererna PHA är både förnybara och biologiskt nedbrytbara och kan tillsammans med andra ingredienser formuleras till bioplaster med ett brett spann av tillämpningar.

Socketarterna i hemicellulosa kan fermenteras till VFA under anaeroba (syrefria) förhållanden av vissa mikroorganismer. Denna process kan drivas så att även vätgas produceras. Bakterier från gruppen *Caldicellulosiruptor* har visat sig vara effektiva när det gäller att producera vätgas samtidigt som VFA. De kan omvandla xylos och arabinos (C5 sockerarter) och har förmågan att bryta ned xylan. Dessa sockerarter nyttjas inte idag för produktion av massa- och papper eller för jäsning till etanol och har därför ett lågt värde. Den bildade vätgasen är en attraktiv energibärare och även plattformskemikalie.

Genom att omvandla någon av processvattenavloppets delströmmar till vätgas, ättiksyra och PHA, avlastas samtidigt den biologiska processvattenreningen vilket kan leda till ökad kapacitet, mindre luftningsbehov och mindre behov av närsalter.

Variation inom skogsindustriell massa-, pappers- och reningsteknik

För att producera ca 1 ton papper eller kartong går det åt 20 - 100 m³ vatten. Hur stora volymer som behövs beror på vilken massaprocess och vilken papperskvalitet som produceras. Även brukets ålder och tekniska utformning spelar stor roll. Innan vattnet kan släppas ut till recipienten behöver det renas. Processvattnet innehåller i stort sett alla delar av veden och vedämnena som processats genom massaprocessen och eventuellt genom blekeriet. Hur stor andel av de vedegna ämnena och till vilken grad de är nedbrutna beror återigen av vilken massaprocess bruket använder och

vilken produkt de tillverkar. I Sverige renas processavloppen i de flesta fall med aeroba biologiska processer. I dag används en lång rad olika aeroba biologiska reningstekniker som alla är anpassade till brukets flöden och processer.

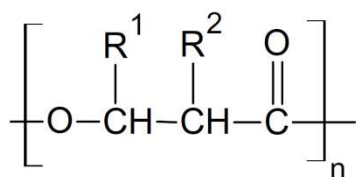
Beroende på vilken massaprocess och vilken reningsteknik som används bildas olika stora mängder bioslam. Slammet avvattnas och torkas innan det destrueras genom att brännas. Täckning av deponier är också ett vanligt sätt att bli av med det.

Skogsindustriella avloppsvatten är näringsfattiga och därför behöver vissa bruk tillsätta näringsämnen för att kunna driva sin biologiska process och producera bioslam. Näringsämnen är kostsamma kemikalier. Och ur ett hållbarhetsperspektiv är fosfor en ändlig resurs som vi borde använda så lite som möjligt av.

Aerob biologisk rening behöver stora volymer luft för att syresätta stora flöden processavlopp. Luften tillsätts och med hjälp av kompressorer eller blåsmaskiner vilka använder den enskilt största andelen av el i brukets reningsverk. Hur mycket el som används beror på hur smutsigt vattnet är och vilken typ av reningsteknik man använder (Stoica et al., 2009).

Biopolymerer i form av polyhydroxyalkanoater (PHA)

Polyhydroxyalkanoater är en grupp av polyestrar som lagras inuti bakterieceller där de fungerar som kol- och energireservoar. En av de vanligast observerade formerna av PHA är poly(3-hydroxybutyrat) (P(3HB) eller PHB) som bland annat bildas med ättiksyra som substrat (Figur 1). Sedan PHB upptäcktes på 1920-talet har man funnit över 150 olika typer av PHA-monomerer. Molekylvikten för PHA är vanligtvis mellan 2×10^5 och 3×10^6 g/mol beroende på mikroorganism och betingelser vilket innebär att antalet repeterande enheter i varje polymer kan vara uppemot 30 000 i genomsnitt.



Figur 1. Generell struktur för P(3HA) med R1 och R2 som variabla sidokedjor. PHB: $R^1 = \text{CH}_3$ och $R^2 = \text{H}$. PHV: $R^1 = \text{CH}_2\text{CH}_3$ och $R^2 = \text{H}$.

Mycket arbete med forskning och utveckling har lagts ned för att ta fram ekonomiska tillverkningsmetoder för PHA baserade på renkulturer av bakterier. Ofta har man strävat efter att maximera PHA-innehållet i cellerna, maximera produktiviteten och att förmå de rena bakteriekulturerna att använda lågvärdiga substrat som restprodukter. Även om det idag finns tillverkare av PHA, är produktionsvolymen mycket låg. Anledningen är att tillverkningskostnaderna med renkulturer fortfarande är relativt höga och att priset på konventionell plast inte

inkluderar de verkliga kostnaderna för att täcka de numera välkända miljökonsekvenserna.

Den PHA som bakterierna ackumulerar måste utvinnas genom att separeras från det övriga cellmaterialet. Detta kan ske genom att polymeren löses i ett organiskt lösningsmedel som sedan kan återvinnas, genom nedbrytning av det övriga cellmaterialet med kemikalie eller mekaniskt (Jacquel et al., 2008). Valet av utvinningsmetod påverkar också egenskaperna på den utvunna polymeren.

PHAs materialegenskaper beror på sammansättningen, dvs. vilka typer av monomerer som ingår, men också på molekylvikten. PHB är i hög grad kristallin och har en densitet kring $1,2 \text{ kg/dm}^3$. De mekaniska egenskaperna är liknande för polypropylen som är en vanlig förpackningsplast med undantag för maximal töjning (5 %) (Lee, 1996). Smält- och glasövergångstemperaturerna är 180°C respektive 4°C och PHB är vattenavvisande (Hänggi, 1995). Även om PHA-polymerer är biologiskt nedbrytbara kan de vara beständiga under lång tid så länge de inte hamnar i en fuktig och nedbrytande miljö. Vid kompostering eller rötning kan PHA brytas ned på några veckor (Lee, 1996).

Förmågan hos bakterier att lagra PHA är utbredd hos många olika sorters bakterier. Många naturligt förekommande bakterier i vår miljö har denna förmåga som strategi att utjämna sin födotillgång. Det är därför inte förvånande att en hel del av de bakterier som finns i en biologisk reningsprocess kan lagra PHA. I reningsprocessen omvandlar de lättnedbrytbara, lågmolekylära organiska ämnen som t.ex. flyktiga fettsyror, alkoholer och kolhydrater till PHA vid god tillgång och utnyttjar PHA för att växa vid sämre tillgång. Förmågan att lagra PHA i slammet kan vara hög även för reningsanläggningar som behandlar kommunalt avloppsvatten trots att de har en relativt låg andel lättnedbrytbart organiskt material jämfört med många industriella processavloppsvatten (Bengtsson et al., 2017b). Vid behandling av mer gynnsamma typer av processavloppsvatten med en process som är designad för att stimulera PHA-lagring, kan man uppnå högre och snabbare PHA-produktion. Under sådana förhållanden kan det överskottsslam som produceras i processen ha förmågan att lagra 50-60 % PHA av slammets slutliga torrsvikt (Anterrieu et al., 2014; Bengtsson et al., 2008). I vissa särskilda fall kan det vara möjligt att uppnå över 70 % (Jiang et al., 2012).

Om bioprocessen inte redan idag har en sådan utformning att bakterier med förmåga att lagra PHA anrikas, kan detta ofta uppnås med hjälp av relativt små ändringar i processen (Bengtsson et al., 2017b). Till överskottsslammet från den biologiska reningen tillsätts en procesström rik på VFA i en separat reaktorvolym under luftade förhållanden så att PHA ackumuleras i slammet. I fall överskott på bioslam föreligger, skickas den resterande delen av överskottsslammet till den konventionella slamhanteringen. I fall VFA finns i överskott relativt mängden överskottsslam, kan närsalter tillsättas under ackumulering så att samtidig produktion av PHA och tillväxt av bakterier sker (Valentino et al., 2015). Det PHA-

rika slammet kan sedan förtjockas och avvattnas innan vidare behandling för torkning och utvinning av PHAn.

Den utvunna PHAn har många tillämpningsområden och kan användas som huvudingrediens i en PHA-baserad biopolymer eller som en tillsats i en formulering som i huvudsak består av andra material (Figur 2). Ett exempel på det senare alternativet är att PHA med fördel kan användas för att förbättra egenskaperna på polylaktat (PLA) som har stor efterfrågan idag men begränsade tillämpningar pga. sin skörhet. Det finns ett stigande intresse för kompositmaterial med fiber och biopolymerer vilket kunna vara ett attraktivt alternativ i närhet till en skogsindustri (Chan et al., 2017).

Olika typer av PHA har olika användningsområden beroende på dess kombination av egenskaper. En viktig faktor är dock att egenskaperna på den PHA som produceras från en process är stabila och förutsägbara. I synnerhet som sammansättningen på ett processavloppsvatten eller annan restström kan ha varierande sammansättning. Detta har nyligen undersökts i en omfattande pilotstudie i Nederländerna, ledd av de personer som nu driver Promiko AB. Det visade sig att överskottsslam från ett kommunalt avloppsreningsverk kunde fås att producera PHA med stabila och förutsägbara egenskaper över fyra årstider av variationer i betingelser och sammansättning hos avloppsvattnet (Bengtsson et al., 2017b). PHA producerad i samband med vattenrening kan alltså resultera i en värdefull produkt.



Figur 2. Exempel på produkter skapade från PHA producerad från restströmmar. Formulering med 74 % PHA (vänster) och PLA med 15 % PHA (höger). Från tidigare publicerad rapport (Bengtsson et al., 2017b) med medverkan från Pezy Group.

Produktion av flyktiga fettsyror och vätgas

Anaerob fermentering av organiska ämnen till VFA, så kallad acidogen fermentering, är en idag väletablerad bioteknisk process implementerad i såväl pilot- som fullskala med syften att omvandla VFAn vidare till PHA eller biogas (Bengtsson et al., 2017a; Demirel & Yenigün, 2002; Tamis et al., 2014). I dessa sammanhang används vanligen en blandad bakteriekultur som kontinuerligt anpassar sig till processförhållandena

och sammansättningen på organiska ämnen i procesströmmen. Därför kan processen drivas i ett brett spann av processbetingelser med avseende på t.ex. temperatur och pH.

Vid acidogen fermentering kan förutom VFA även vätgas (H_2) produceras. Vätgas har hög energidensitet, bildar ingen koldioxid vid förbränning och anses därför vara ett framtida eftertraktat bränsle (Balat, 2008; Ingersoll, 1996; Sequeira & Santos, 2010). Även vätgasproduktion kan ske vid olika processförhållanden men forskning har visat att höga temperaturer ($> 60^\circ C$) kan vara gynnsamma för att producera vätgas med olika typer av förnybar biomassa (Kengen et al., 2009; Pawar & van Niel, 2013). Medlemmarna i genus *Caldicellulosiruptor* har blivit erkända som en av de mest effektiva termofila vätgasproducenterna (Pawar & van Niel, 2013).

En av dessa medlemmar är *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* som är en extremt termofil obligatorisk anaerob, som kan producera VFA i form av ättiksyra samt vätgas från en mängd olika mono-, di- och oligosackarider som finns i olika förnybara biomassa (De Vrije et al., 2009; de Vrije et al., 2010; Ivanova et al., 2009; Pawar et al., 2013; van de Werken et al., 2008). *C. saccharolyticus* fungerar optimalt vid $70^\circ C$ och har till skillnad från vissa andra vätgasproducenter en förmåga att bibehålla tillväxt och vätgasproduktion utan att den producerade gasen behöver avlägsnas genom att drivas av (Willquist et al., 2011; Pawar et al., 2014). Andra fördelar är dess förmåga att växa under näringsfattiga förhållanden (Willquist & van Niel, 2012) och att assimilera oorganiskt sulfat som enda svavelkälla (Pawar & van Niel, 2014). *C. saccharolyticus* har en god förmåga att bryta ned polysackarider från hemicellulosa och förmåga att omvandla xylos och glukos samtidigt och därför borde processavlopp från massa- och pappersindustri vara lämpliga substrat.

Emedan acidogen fermentering till VFA är en teknik som tillämpas flitigt redan idag, befinner sig vätgasproduktion, dvs. acidogen fermentering till både VFA och vätgas, under forskning och utveckling. Processteknisk utveckling pågår som syftar till att bland annat öka koncentrationen av biomassa i reaktorn och på så sätt öka den volymetriska H_2 -produktivitet (Ljunggren et al., 2011; Ljunggren & Zacchi, 2010; van Niel et al., 2003; Willquist et al., 2009). Forskare vid Lunds universitet utvecklar också, med hjälp av evolutionstekniska metoder, stammarna av *C. sarccarolyticus* så att de blir mer toleranta för verkliga förhållanden.

Produktion av endast VFA med konventionell acidogen fermentering, för vidare omvandling till PHA skulle innebära en lägre teknisk tröskel och därmed risk vid implementering. I denna studie valdes ändå att undersöka produktion av både VFA och H_2 med *C. sarccarolyticus* G5 (CG5) för att göra det möjligt att utvärdera en sådan kombinerad produktion.

Miljömässig utvärdering

Att omvandla rester från processavloppsvatten till produkter kan mycket väl vara fördelaktigt sett till resurshantering. Men från ett mer holistiskt, hållbarhetsbaserat perspektiv bör även potentiella miljömässiga fördelar utvärderas. Livscykelanalys

(LCA) är gängse metodik för att bedöma och jämföra de miljömässiga effekterna av olika processalternativ. Kaskadprocessen kan jämföras med dagens processvattenbehandling med avseende på t.ex. utsläpp av koldioxidkvalenter som härrör från elanvändning för luftning, kemikalieförbrukning med mera. För att kunna jämföra alternativ som genererar produkter görs vanligen antagandet att varje produkt ersätter en annan, redan tillgänglig produkt, och på så sätt erhålls en CO₂-kredit genom att utsläpp förknippade med den ersatta produkten undviks. Det finns flera metodologiska utmaningar med LCA på processer för PHA-produktion (Heimersson et al., 2014). Icke desto mindre är det en värdefullt och etablerad metodik för bedömning av miljöprestanda för olika alternativa processlösningar (Gerngross, 1999; Akiyama et al., 2003; Gurieff et al., 2007). Det har tidigare visats att produktion av PHA i samband med behandling av kommunalt avloppsvatten kan ha väsentliga miljömässiga fördelar (Morgan-Sagastume et al., 2016).

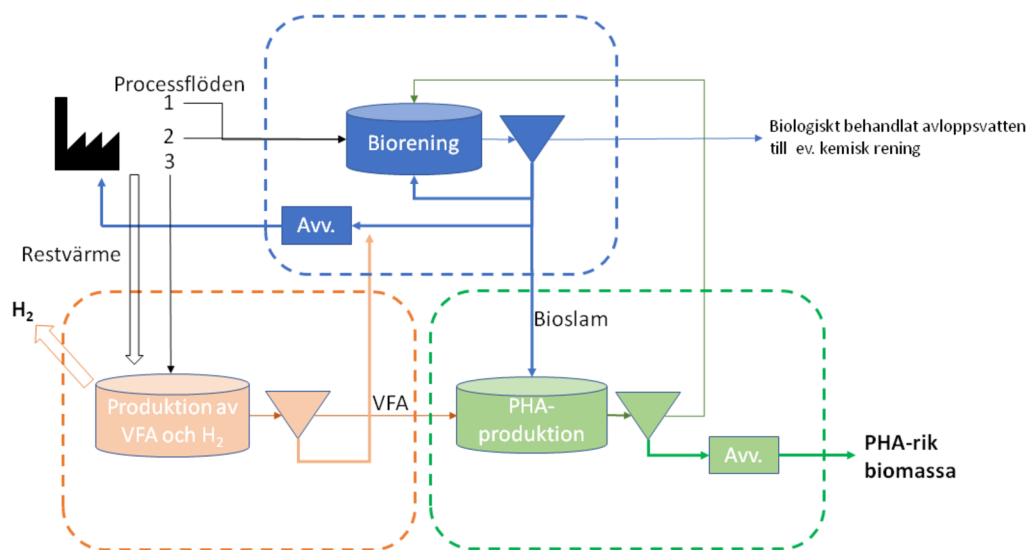
Syfte och mål

Syftet med detta projekt har varit att utvärdera kaskadprocessen för produktion av biopolymerer av typen PHA och biovätgas ur skogsindustriella restflöden och identifiera strategier för fortsatt utveckling och stegvis implementering av konceptet. För att få en god generell uppfattning om potentialen, har fyra bruk med olika massa-och pappers processer samt olika reningsteknik ingått i studien.

Potentialen att producera PHA och biovätgas från processavloppsströmmar vid dessa fyra bruk har beräknats. Samtidigt har effekterna som den nya tekniken kan få för bruken i form av t.ex. minskad belastning på befintliga reningsprocesser och energianvändning också uppskattats. Processens miljöprestanda har jämförts med dagens processvattenbehandling med hjälp av en förenklad LCA och hållbarhetsanalys. Den ekonomiska potentialen har bedömts och en tänkbar affärsmodell diskuteras. Ytterligare aktörer har knutits till en planerad vidareutveckling av processen.

Genomförande

I detta projekt har potentiella produktionsmängder av PHA och biovätgas beräknats baserat på erfarenheter från tidigare studier. I juni 2017 träffades projektgruppen och enades om systemets gränser och vilka data som behövde samlas in för att kunna uppskatta hur mycket PHA, VFA och biovätgas som skulle kunna produceras ur skogsindustriella restprodukter. I Figur 3 syns en schematisk skiss över systemets gränser och undersystemens relationer till varandra.



Figur 3. Beskrivning av kaskadkonceptets olika systemgränser. Avv.=avvattning.

Under september och oktober besökte projektgruppen fyra bruk med olika förutsättningar i form av massa- och pappersprocesser samt typ av reningsteknik. De flesta bruk blandar flera avloppsströmmar från olika delar av fabriken i ett kombinerat processavlopp som sedan renas med aerob biologisk reningsteknik. Syftet med besöken var att kartlägga delflöden som kan innehålla hemicellulosa och andra lättnedbrytbara ämnen och som därför kan användas som substrat i kaskadprocessens delsteg. Syftet var också att samla data för att möjliggöra en modell av reningsverket. I Tabell 1 beskrivs de olika bruken och deras stora spridning i massa-, pappersprocess samt reningsteknik översiktligt.

Tabell 1. Kortfattad beskrivning av de massa- och pappersbruk som ingick i studien.

Bruk	Typ av massa- och pappersprocess	Produkt (ton/år)	Typ av reningsprocess	Proc. avlopp till biorening (m3/d)	TOC renat i biorening (ton/dag)
1	Sulfatmassa och CTMP, vätskekartong	778 000	Långtids-luftad aktivslam	25 000	10,0
2	Sulfat- och neutralsulfitmassa, fluting, säckpapper mm	710 000	MultiBio, flerstegs reaktor	46 000	13,9
3	Sulfatmassa, kraftpapper	230 000	MBBR i två steg	21 600	1,1
4	TMP och CTMP	170 000	Långtids-luftad aktivslam	8 000	10,8

Under oktober och november upprättades beräkningsmodeller för de olika brukena. Med modellerna beräknades slamproduktion, energiförbrukning för luftning och slamhantering. I ett första steg verifierades modellen mot uppmätta värden (referens fall).

I nästa steg antogs att ett av brukets delflöden värms till 70°C med lågvärdig restvärme, för att sedan ledas till vätgasprocessen. Modellen av reningsverket uppdaterades för de nya förhållandena eftersom belastningen kommer att minska när ett delflöde avskiljs. Ny slamproduktion och energianvändning beräknades.

Möjlig produktion av VFA (framförallt ättiksyra) och vätgas beräknades utifrån innehållet av organiskt material i del-processflödet. Även bildning av biomassa från vätgasprocessen samt nya korrigerade halter av organiskt material beräknades. Sedan beräknades möjlig produktion av PHA i bioslammet från reningsverket, när det blandades med den VFA-rika procesströmmen från vätgasprocessen.

En omställning mot en bioteknisk kaskad kommer att ge upphov till effekter för brukena i form av förändrad slamproduktion, elförbrukning för rening och slamhantering samt produktion och användning av lågvärdig värme. I en av projektets workshops samlades projektgruppen och representanter från brukena för att diskutera preliminära resultat och vilka effekter ett kaskadsystem skulle kunna få.

För de fyra bruken gjordes totalt 11 modeller där möjlig produktion av PHA och vätgas beräknades från olika delströmmar samtidigt som övriga effekter uppskattades. Utifrån resultaten av dess beräkningar valdes två fall ut för en mer detaljerad utvärdering. I följande metodkapitel kommer ekvationer, tillvägagångssätt och indata för beräkningar, att presenteras för de tre biologiska processerna i separata avsnitt. Även beräkningar av energibalanser beskrivs separat.

Under november anordnades en workshop där projektets olika parter träffades, inklusive bruken och Pöyry AB, för att tillsammans utvärdera positiva och negativa effekter hos bruken i fall det nya biotekniska konceptet skulle implementeras. Vid samma workshop diskuterade alla parter hållbarhetsanalysen, förutsättningar inför en förenklad jämförande LCA samt indata till en möjlig affärsmodell. De som inte kunde skicka en representant till workshopen, intervjuades vid annat tillfälle. Metoden för LCA, hållbarhetsanalysen och affärsmodellen beskrivs i egna kapitel.

Beräkningar kring processvattenreningen

När en delström av ett bruks processavlopp leds till kaskadprocessen istället för till reningsverket, kommer det att få konsekvenser i form av minskad belastning på reningsverket. När mindre totalt organiskt kol (TOC) behöver renas behövs mindre syre, mindre slam kommer att bildas och därför minskar även närsaltsbehovet. Slamproduktionen är central och enligt Tchobanoglous et al. (2014) kan slamproduktion (P_{ax}) i ett biologiskt reningsverk beräknas enligt ekvation [1].

$$P_x = \frac{YQ(S-S_0)}{1+k_dSRT} + \frac{f_d k_d YQ(S-S_0)SRT}{1+k_dSRT} \quad [1]$$

P_{ax}	Bioslam produktion (g/d)
Y	Slamutbyte (g VSS/g COD)
S	halt Substrat efter rening (g COD/m ³)
S_0	halt Substrat in till reningsverk (g COD/m ³)
SRT	Slamålder (d)
k_d	nedbrytnings koefficient (g/g, d)
f_d	del av nedbrutet material som kan användas som substrat (g/g)

Närsaltbehovet att producera slammet kan beräknas utifrån antagandet att det bildade slammet innehåller 1% P och 7% N.

Syrebehovet (R_0) för att bryta ner COD och bilda slam kan beräknas enligt ekvation [2]

$$R_0 = Q(S - S_0) - 1.42P_x \quad [2]$$

Den verkliga förbrukningen av syre beror på det teoretiska syrebehovet för mikroorganismerna men även på hur stor del av den tillförda luften som hinner tas upp och användas. Hur effektiv syretransporten är beror av flera fysikaliska och yttre omständigheter. För bottenluftare har även djupet och trycket i bubblorna

betydelse vilket syns när det standardiserade syre behovet beräknas med ekvation [3] och [4] med indata från Tabell 2.

$$AOTR = SOTR \left(\frac{\beta C_{STH}^- - C_L}{C_{s,20}} \right) (1,024^{T-20}) (\alpha) (F) \quad [3]$$

- AOTR = Verklig syreöverföringshastighet (g/d) = R_0
 SOTR = Syreöverföringshastighet under standardförhållanden (g/d) i rent vatten vid 20°C och 0 mg/l löst syre
 C_{STH} = Mättnadskoncentration (mg/l) av syre i rent vatten vid temperaturen T och höjd över havet H
 C_{STH}^- = Medelmättnadskoncentration (mg/l) av syre i rent vatten vid tryck som motsvarar halva djupet av bassängen
 C_L = Koncentration av löst syre under drift (mg/l). Normalt 0,5 – 1 mg/l
 $C_{s,20}$ = Mättnadskoncentration av löst syre i rent vatten vid 20°C (mg/l)
 α = Korrektionsfaktor för syreöverföring m.a.p vattnets karaktär
 β = Korrektionsfaktor för syreöverföring för vattnets löslighetsegenskaper.
 F = Igensättningsfaktor. Normalt värde 0,65 – 0,9

$$C_{STH}^- = C_{STH} \left(\frac{P_{atm,H} + P_{w,medel djup}}{P_{atm,H}} \right) \quad [4]$$

- P_{atm} = Lufttryck vid ytan
 P_w = Extra tryck vid halva djupet av bassängen p.g.a. vattenpelare

Tabell 2. Indata för beräkningar av slamproduktion och luftningsbehov i processvattenreningen i de olika modellerna.

	Y	SRT	k_d (20°C)	f_d	α	β
Bruk 1	0,3	6	0,12	0,08	0,8	0,95
Bruk 2	0,4	20	0,12	0,08	0,8	0,95
Bruk 3	0,5	6	--	--	0,8	0,95
Bruk 4	0,5	3	0,12	0,08	0,8	0,95

Beräkningar kring produktion av PHA

Utgående klarfas från biovätgasprocessen antogs användas för produktion av PHA med hjälp av den blandade kulturen av mikroorganismer som utgör överskottsbioslammet från den biologiska processvattenreningen. Följande antaganden gjordes:

- Bioslammet från processvattenreningen har redan idag, eller kan med relativt enkla justeringar i reningsprocessen erhålla en kapacitet att lagra PHA motsvarande 60 % av dess organiska torrsvikt (Anterrieu et al., 2014; Bengtsson et al., 2008; Jiang et al., 2012). Det innebär att efter PHA-processen består 1 kg VSS slam av 0,6 kg PHA och 0,4 kg övrigt organiskt material inklusive bakteriernas övriga cellmassa (cellmembran, proteiner, RNA m.m.).
- Den inkommande strömmens ättiksyra och mindre inslag av mjölksyra och etanol antogs omvandlas till PHA med utbytet 0,34 g-PHA/kg konsumerat substrat. Ett sådant utbyte är typiskt för vad som har uppnåtts i pilotskala (Bengtsson et al., 2017a).
- Ifall underskott på överskottsslam förelåg, antogs tillsats av närsalter ske under PHA-ackumuleringen på så sätt att samtidig tillväxt av bakterier och lagring av PHA skedde (Bengtsson et al., 2008; Valentino et al., 2015). Tillväxten av biomassa antogs också ske med utbytet 0,34 g-VSS/kg (Valentino et al., 2015). Förbrukningen av närsalter antogs vara 70 g respektive 10 g per kg VSS icke-PHA-biomassa producerad (Keskitalo et al., 2010).
- Ackumulering av PHA antogs drivas på så sätt att reduktionen av VFA var fullständig och reduktionen av TOC 90 % (Bengtsson et al., 2008).
- Förbrukning av syre uppskattades från en COD-balans och SOTR beräknades med typiska värden för syreöverföringseffektivitet ($\alpha = 0,8$ och $\beta = 0,95$) (Tchobanoglous et al., 2014).
- Förtjockning och avvattning av PHA-rikt slam antogs ske till 6 % respektive 25 % med 95 % avskiljningsgrad. Systemets slutprodukt var således detta PHA-rika slam, avvattat till 25 %, för vidare bearbetning i form av t.ex. transport, torkning och utvinning.

Beräkningar kring produktion av VFA och biovätgas

Ett antal antaganden gjordes för att beräkna mängden biovätgas som kan produceras med användning av en viss ström i en massa- och pappersindustri:

- För processavloppsströmmar från blekeri och pappersmaskiner antogs att 50 % av COD bestod av sockerarter och att inga flyktiga fettsyror närvarade.
- Det organiska materialet i delströmmar från CTMP-tillverkning antogs innehålla 15 % kolhydrater och 40 % ättiksyra av COD (Larsson, 2015; Pochon et al., 1988; Rintala and Puhakka, 1994).
- 80 % av sockerarterna antogs vara glukos och resten xylos.

- Det antogs att en UA-reaktor (upflow anaerobic) användes vilket innebär att uppehållstiden för de mikrobiella cellerna kan ökas genom att de behålls i reaktorn.
- Hastigheterna för omvandling av socker och produktion av vätgas antogs vara enligt vad som tidigare observerats vid laborieförsök, nämligen 39,4 kg/m³/dag för socker och 1 kg/m³/dag för H₂ (Pawar et al., 2014).
- Reaktorns volym uppskattades från det volymetriska flödet och omvandlingshastigheten för socker.
- De totala mängderna av vätgas, ättiksyra (samt mindre inslag av mjölksyra och etanol) och biomassa som producerades uppskattades utifrån sockerkonsumtionen.
- Mängden näringsämnen som behövs i processen beräknades baserat på sammansättningen på den producerade biomassan enligt en tidigare studie.

Energiberäkningar

För energibehovet för luftningen antogs att de använda luftarna har en syrerövegång motsvarande 1,75 kg O₂/kWh vilket beräknas mot SOTR. Avvattning och torkning beräknades via de antagna värdena i Tabell 3

Tabell 3. Antagen energiåtgång för avvattning och torkning baserat på Sandberg (2017).
TS=torrsubstans.

Metod	Energibehov kWh/ton TS
Sedimentation	5
Filterpress	10
Skruvpress	10
Centrifug	75
Indunstning	50

För samtliga vikt-volym-omvandlingar antas slammet ha en densitet av 1 ton/m³. Det effektiva energiinnehållet i slammet som förbränns erhöles från Sandberg (2017) antaget en askhalt av 5 % och en torrhalt av 30 % på bioslammet från Bruk 1 och vätgasprocessen (4 MJ/kg) respektive 70 % på bioslammet från Bruk 2 (12 MJ/kg).

Energibehovet för uppvärmningen (ΔT °C) av strömmarna inför vätgasprocesserna beräknades enligt [5] där C_p antagits till ett konstant behov av 4.18 kJ/kg°C, \dot{m} massflödet och η_c är värmeåterföringens verkningsgrad (antagen till 50 %).

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \times \eta_c \quad [5]$$

Miljömässig livscykelanalys (E-LCA)

Miljömässig livscykelanalys (E-LCA) är ett verktyg som främst används inom hållbarhetsanalyser för att utvärdera de möjliga livscyklernas miljömässiga påverkan på samhälls nivå vid förändringar av befintliga processer. E-LCA används även för att jämföra olika alternativ baserat på deras miljömässiga profiler. Den metodik som använts i denna studie följer riktlinjerna i ISO 14040 (2006) och ISO 14044 (2006).

En förenklad LCA utfördes för att utvärdera vilka miljömässiga effekter förändringarna som görs från grundtillståndet, dvs. dagens processavloppsvattenhantering, kan få om kaskadprocessen används. Utvärderingen begränsades till två av de undersökta fallen, nämligen Bruk 1 (CTMP), när procesströmmen från brukets CTMP-produktion leds till kaskadprocessen samt Bruk 2 (PM6), när processavlopp från pappersmaskin 6 leds till kaskadprocessen. Tidsperioden för analysen var ett år av kontinuerlig produktion.

Eftersom de nya produkterna PHA och vätgas bildas ur TOC som i referensfallet renas i reningsverket, används "per massenhet av totalt organiskt kol (TOC) renat från processavloppet" som funktionell enheten för analysen. Resursanvändningen redovisas på formen "kg CO₂-ekvivalenter", och genom att dela med vikten hos den reducerad mängden TOC, erhöles den sökta och fördefinierade indikatorn. Således utvärderades klimatpåverkan i form av kg CO₂-ekvivalenter per kg reducerad TOC. Användningen av el, baserad på en svensk elmix, och tillsatser av kemikalier som kväve och fosfor inkluderades. I framtida studier kan analysen utvecklas för att inkludera även andra typer av miljöpåverkan än utsläpp av CO₂-ekvivalenter.

Användningen av den PHA som produceras från processen antogs vara densamma som för den PHA som idag produceras med renkulturer, eftersom detta är den idag tillgängliga produkt som mest liknar den PHA som skulle produceras med kaskadprocessen. PHA producerad av kaskadprocessen antogs därför ersätta PHA producerad av en renkultur vilket minskar processens CO₂-avtryck med motsvarande mängd. Koldioxidavtrycket från produktionen av PHA med monosackarider från majs som substrat med renkulturer är enligt Heimersson et al. (2014) 3,2 kg CO₂-ekvivalenter per producerat kg PHA. Den vätgas som produceras antogs ersätta olja som bränsle i burken. Koldioxidavtrycket från den ersatta oljan (330 kg per MWh) samt för produktion och överföringen av den svenska elmixen (68,5 kg per MWh) erhöles från Weisser (2007) och IEA (2017). Livscykelsutsläppen av växthusgaser från de kemikalier som används för att tillföra fosfor och kväve till bioprocesserna, ammoniumnitrat (2,97 kg CO₂-ekv /kg) och fosforsyra (1,46 kg CO₂-ekv /kg) hämtades från Ecoinvent's LCA-databas (Swiss Centre for Life-cycle Inventories, 2017).

Brukens spillvärme antogs kunna täcka värmebehovet för uppvärmning av flödet till vätgasprocessen. De koldioxidutsläpp som hade ett biologiskt ursprung (från ved) antogs inte ha någon klimatpåverkan. Detta gäller den CO₂ som bildas vid biologisk oxidering av organiska ämnen från processavloppsvattnet i reningsprocessen eller i kaskadprocessen och vid förbränning av slam från dessa processer. Fosfor bunden

till slammet hanterades inte i analysen liksom eventuella effekter av utsläpp av kväveoxider till följd av förbränningen. Förbränningen av vätgas bildar endast vattenånga och orsakar följaktligen inget koldioxidutsläpp. Miljöeffekter orsakade av upprättandet av anläggningarna för produktion PHA och vätgas antogs vara försumbara sett till anläggningarnas livslängd.

Hållbarhetsanalys

Under ett av projektets workshops samlades projektgruppen tillsammans med representanter från bruken för att diskutera preliminära resultat samt vilka effekter de kan ha för bruken. I samband med workshopen gjordes en hållbarhetsanalys enligt Lighter-metoden (resource-sip.se).

Affärsanalys

Intäkter och kostnadsberäkningar

Intäkterna beräknades genom att använda genomsnitt av de marknadspriser för respektive produkt som inhämtats och de uppskattade mängderna av produkterna från respektive ström. Genomsnittspriset för vätgas var 54 000 SEK/ton och för PHA 45 000 SEK/ton. Upp till 65 % av cellbiomassan av *C. saccharolyticus*-celler innehåller proteiner (Zeidan, 2010). Dessa celler kan användas för att tillverka fiskfoder. Därför räknades förutom vätgasen och PHA också cellproteinet som en produkt. Det genomsnittliga priset som användes för cellproteinet var 11 381 SEK/ton. De totala potentiella intäkterna för alla scenarier beräknades per år.

Kostnaderna uppskattades med avseende på investeringskostnader (CAPEX) och driftskostnader (OPEX) då detta var möjligt och i övrigt identifierades källor till troliga kostnader. Totala kostnader kunde endast grovt uppskattas och diskuterades därefter i relation till potentiella intäkter.

Aktörsanalys och konsortieavtal

Under projektets gång har relevanta aktörer för framtida affärer identifierats och kontaktats. Dessa har delats in i olika områden som behovsägare, teknikutvecklare och forskare. Baserat på intervjuer med dessa aktörer har en ny beskrivning tagits fram för ett projekt för fortsatt utveckling och demonstration, nämligen "Miljötjänster från ett multifunktionellt bioraffinaderi (MultiBio)" som finansieras till 20 % av industrin och 80 % av Vinnova och kommer att starta i januari 2018. De aktörer som var intresserade av att stödja teknisk utvärdering och uppskalning av resultaten rapporterade i detta projekt har bett skriva på en partners godkännande för ekonomiskt och tekniskt åtagande i projektet.

För att stimulera exploatering och annat nyttiggörande av resultat från MultiBio och andra framtida projekt och affärsverksamheter relaterade till nuvarande projekt, har ett konsortieavtal tagits fram efter diskussioner inom projektgruppen. Avtalet bygger på standardavtal inom EUs H2020-projekt (DESCA) men är något förenklat och översatt till svenska. Avtalet reglerar parternas rättigheter till resultat

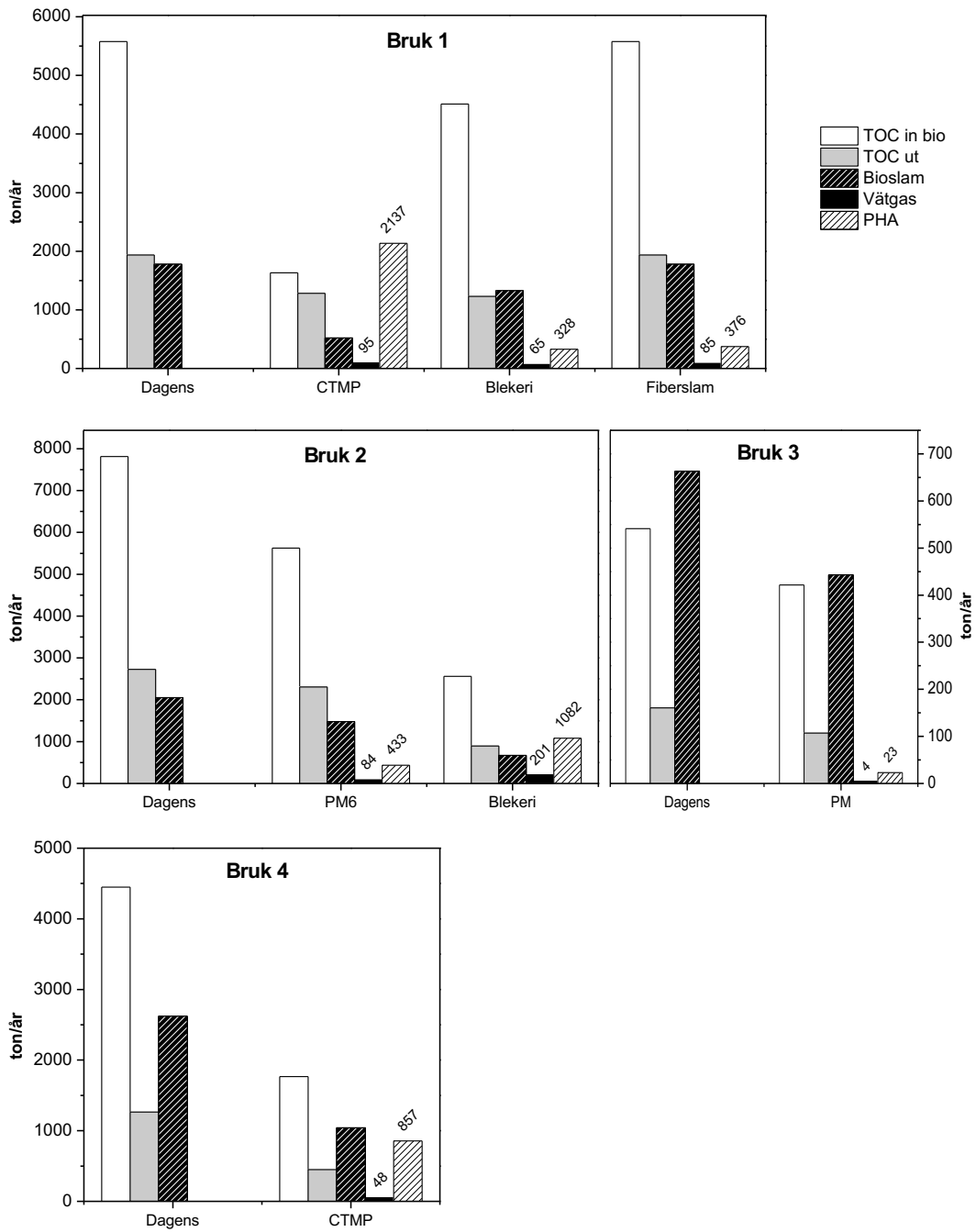
framtaga före projekt och i samarbete samt partners skyldigheter, t.ex. med avseende på hur lång tid parterna har för att lämna invändningar innan publicering av resultat sker.

Resultat och diskussion

Potential för produktion av vätgas och PHA från pappers- och massbruken

Produktionspotentialen för PHA och vätgas beräknades för 11 olika fall (Figur 4). För tre av de fyra bruken var de uppskattade mängderna 800 - 2000 ton/år PHA och 50 - 200 ton/år vätgas ifall en delström i bruket skulle användas för kaskadprocessen.

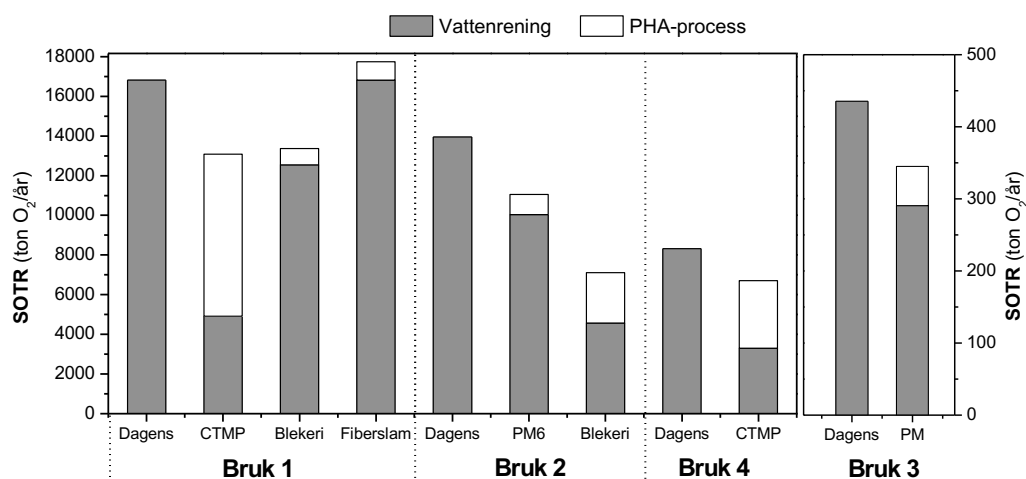
Det kan konstateras att sammansättningen på den delström som används för kaskadprocessen har stor betydelse för mängden PHA och vätgas som potentiellt kan produceras. Processavloppsvatten från blekeriprocesser kan antas innehålla kolhydrater som kan omvandlas i biovätgasprocesses men endast försumbara mängder av VFA. Processavloppsvatten från framställning av CTMP-massa innehåller däremot upp till 35 - 40 % VFA, 30 - 40 % lignin och 10 - 15 % kolhydrater (Larsson, 2015; Pochon et al., 1988; Rintala and Puhakka, 1994). VFA:n är framförallt i form av ättiksyra. Ättiksyran som produceras under biovätgasprocessen adderas till den ättiksyra som fanns i det obehandlade vattnet. Därmed kan mer PHA i förhållande till vätgas produceras från en sådan ström jämfört med en ström med kolhydrater men utan VFA.



Figur 4. Dagens situation i jämförelse med uppskattningar baserade på om en delström används till kaskadprocessen. Belastning till den biologiska processvattenreningen (TOC in bio), utgående mängd organiskt material (TOC ut), produktion av bioslam (ton TS) och uppskattade produktionspotentialer av vätgas och PHA (ton).

Den minskning i luftningsbehov som kan förväntas i den biologiska processvattenreningen blir, i relativa termer, ungefär lika stor som minskningen i slamproduktion. Produktionen av PHA kräver också syre och därmed luftning. Det totala luftningsbehovet kan dock förväntas minska eftersom en mindre andel av det

ingående organiska materialet oxideras till koldioxid. Den uppskattade minskningen i det totala luftningsbehovet var 20-50 % (Figur 5).



Figur 5. Syrebehov under standardförhållanden i processvattenreningen (WWT) och i PHA-produktionssteget (PHA) i befintlig anläggning och vid olika scenarier där respektive delström används för kaskadprocessen.

Två scenarier valdes för mer ingående utvärdering. Dessa var:

1. Bruk 1 med delström från CTMP (Tabell 4).
2. Bruk 2 med delström från PM6 (Tabell 5).

Anledningarna att dessa fall studerade närmare var följande

- De representerade scenarier med relativt hög potential av vätgas och PHA.
- Även om potentialen av vätgas och PHA vid Bruk 2 var lägre med delströmmen PM6 än med delströmmar från blekeri, valdes PM6 eftersom denna ström har en högre koncentration av organiskt material. Det leder till en högre förväntad koncentration av ättiksyra efter vätgasprocessen vilket i vissa fall kan förenkla implementeringen av PHA-processen.
- Två bruk med olika befintliga system för processvattenhantering.
- Två olika pappers/massaprocesser vilket innebär olika förväntad sammansättning på delströmmarna.
- Insikter angående ett tredje intressant fall, Bruk 4 med delström från CTMP, kan i viss utsträckning fås från fall 1 ovan eftersom de aktuella procesströmmarna förväntas vara likartade.

Bruk 1

Vid Bruk 1 identifierades delströmmar från CTMP-tillverkning och blekeri som potentiellt gynnsamma för kaskadprocessen (Tabell 3). Att använda dessa strömmar för PHA- och vätgasproduktion skulle leda till en 70 % respektive 20 % lägre organisk belastning på den befintliga reningsprocessen och en minskning i slamproduktion och luftningsbehov i samma storleksordning. Den uppskattade potentialen av vätgas och PHA var ca 100 respektive 2 000 ton per år från CTMP-strömmen och 65 ton/år vätgas och 300 ton/år PHA från blekeriströmmen.

I dagsläget tillsätts endast försumbara mängder närsalter till reningen vid Bruk 1, eventuellt på grund av att kvävefixering gynnas i systemet. Vid tillväxt inom kaskadprocessen antogs dock mer konservativt att heterotrof tillväxt sker med ett konventionellt näringsbehov. Det ledde till att mängd tillsatta närsalter skulle öka vid användning av kaskadprocessen.

Antagandet att vätgasproduktionen skulle ske vid 70°C ledde till ett stort energibehov för uppvärmning. Samtidigt blir en mindre mängd bioslam tillgänglig för förbränning vilket leder till mindre mängd producerad värme. I Tabell 4 syns att med i den nuvarande processen produceras ca 1 620 MWh/år värme när bioslammet förbränns. Med en kaskadprocess under angivna förhållanden, dvs. att vätgasprocessen drivs termofilt vid 70°C, skulle värmen från förbränning av bioslammet samt ytterligare ca 54 000 MWh spillvärme att behövas för att täcka värmebehovet.

En uppskattning gjordes också av hur mycket som skulle kunna produceras från det fiberslam som idag avskiljs. Att utnyttja detta fiberslam skulle kunna vara ett attraktivt scenario med tanke på den lägre risk det skulle innebära med en process helt frikopplad från befintlig processvattenhantering. Den uppskattade potentialen att producera PHA och vätgas från detta fiberslam var ca 85 ton/år vätgas och ca 370 ton/år PHA. I detta scenario uppnås ingen effekt på den befintliga biologiska reningen i form av minskad slamproduktion eller luftningsbehov (Figur 5).

Tabell 4. Sammanfattande resultat för referensfall där allt vatten från Bruk 1 renas i nuvarande reningsverk samt kaskadsystem där CTMP-avlopp används för produktion av VFA och vätgas varefter den VFA-rika strömmen används för PHA-produktion med bioslam.

	Bruk 1 referensfall	Bruk 1, CTMP till kaskadsystem
Reningsverket		
TOC reduktion (ton/år)	3 650	1 060
Bioslam produktion (ton/år)	1 780	520
Närsaltsbehov (ton N och P/år)	0	0
El luftning (MWh/år)	9 610	2 810
El avvattning (MWh/år)	85	55
Värme förbränning slam (MWh/år)	1 620	0
Vätgasprocessen		
Produktion av H ₂ (ton/år)		95
Produktion av VFA (ton/år)		9 992
Slamproduktion (ton/år)		197
Närsaltsbehov (ton N och P/år)		25,5 och 1,7
Värmebehov (MWh/år)		55 051
El för avvattning (MWh/år)		336
Värme förbränning slam (MWh/år)		103
PHA-processen		
VFA in (ton/år)		10 230
PHA-produktion (ton/år)		2 137
Närsaltsbehov (ton N och P/år)		78 och 11
El för luftning (MWh/år)		4 670
El för avvattning (MWh/år)		39
Summa förändring för bruket	Referens	Med kaskadsystem
Bioslam produktion (ton/år)	1 780	717
Närsaltsbehov (ton N och P /år)	0 och 0	103 och 13
Elbehov luftning + avvattning (MWh/år)	9 610	7 930
Värmebehov (MWh/år)	-1 620	54 948

Bruk 2

För bruk 2 identifierades delavloppet från PM6 som ett lämpligt substrat för kaskadprocessen. Mängden organiskt material (ton/år) i denna ström är totalt sett mindre än i exempelvis blekerifiltratet men koncentrationen av organiskt material är högre vilket medför kompaktare bioprocesser och mindre behov av värme. Belastningen av organiskt material på reningsverket skulle med kaskadprocessen minska med 25 %. Även elanvändning för luftning minskar med ungefär lika mycket. Behovet av kväve minskar medan behovet av fosfor ökar något. Möjlig produktion

av PHA beräknades vara ca 400 ton/år och vätgasproduktionen beräknas till ca 80 ton/år.

Även i detta fall skulle värmen producerad från förbränning av bioslammet plus extra spillvärme som kommer att behövas ifall man skulle välja att driva den acidogena fermenteringen med vätgasproduktion vid 70°C.

Ifall blekeriströmmen vid Bruk 2 skulle användas för kaskadprocessen, och tekniken anpassas till den lägre koncentrationen av organiskt material, uppskattades att 1 000 ton/år PHA skulle kunna produceras och ca 200 ton/år vätgas. Minskningen i belastning på den befintliga processvattenreningen skulle bli ca 65 %.

Tabell 5. Sammanfattande resultat för referensfall där allt vatten från Bruk 1 renas på vanligt sätt i nuvarande reningsverk samt kaskadsystem där PM6-avlopp används för produktion av VFA och vätgas varefter den VFA-rika strömmen används för PHA-produktion med bioslam.

	Bruk 2 referensfall	Bruk 2, PM6 till kaskadsystem
Reningsverket		
TOC reduktion (ton/år)	5110	2303
Bioslam produktion (ton/år)	2050	1477
Närsaltsbehov (ton N och P/år)	132 och 9	88 och 15
El luftning (MWh/år)	7970	5738
El avvattning (MWh/år)	200	51
Värme förbränning slam (MWh/år)	9920	4780
Vätgasprocessen		
Produktion av H ₂ (ton/år)		84
Produktion av VFA (ton/år)		1136
slamproduktion (ton/år)		165
Närsaltsbehov (ton N och P/år)		21,6 och 1,5
Värmebehov (MWh/år)		15 257
El för avvattning (MWh/år)		312
Värme förbränning slam (MWh/år)		92
PHA-processen		
VFA in (ton/år)		1340
PHA-produktion (ton/år)		433
Närsaltsbehov (kg N och P/år)		0
El för luftning (MWh/år)		581
El för avvattning (MWh/år)		64
Summa förändring för bruket		
	Referens	Med kaskadsystem
Bioslam produktion (ton/år)	2730	1640
Närsaltsbehov (ton N och P/år)	132 och 9	109 och 16,5
Elbehov luftning + avvattning (MWh/år)	8170	6745
Värmebehov (MWh/år)	-9920	10 387

Bruk 3

Vid Bruk 3 identifierades delströmmen PM5 som den mest attraktiva för produktion av PHA och vätgas. Den uppskattade produktionspotentialen var mindre än vid de andra bruken med 20 ton/år PHA och 4 ton/år vätgas.

Bruk 4

Vid Bruk 4 fanns det liksom vid Bruk A en delström från tillverkning av CTMP. Potentialen från denna ström uppskattades till 800 ton/år PHA och 50 ton/år vätgas. Den åtföljande minskningen i belastning på den befintlig processvattenrening skulle bli ungefär 60 %. Produktion av biovätgas kan också ske i form av förbehandling innan produktion av metan. I ett sådant scenario skulle den uppskattade mängden vätgas kunna produceras med efterföljande rötning till metan istället för PHA. En kombination där en del av det organiska materialet vätgasprocessen används för metan och en del för PHA kan också vara ett alternativ.

Energiberäkningarna bygger till stor del på generella antaganden och erfarenhetsvärlden från befintliga reningsverk vilket innebär en viss osäkerhet som ska tas i beaktande. Beräkningarna bör ändå ge en god bild av de generella och relativa förändringar som kan förväntas med kaskadprocessen vid användning av de olika strömmarna. Framtida studier bör se till specifika lösningar för de olika systemdelarna och därigenom bör mer exakta värden kunna tas fram.

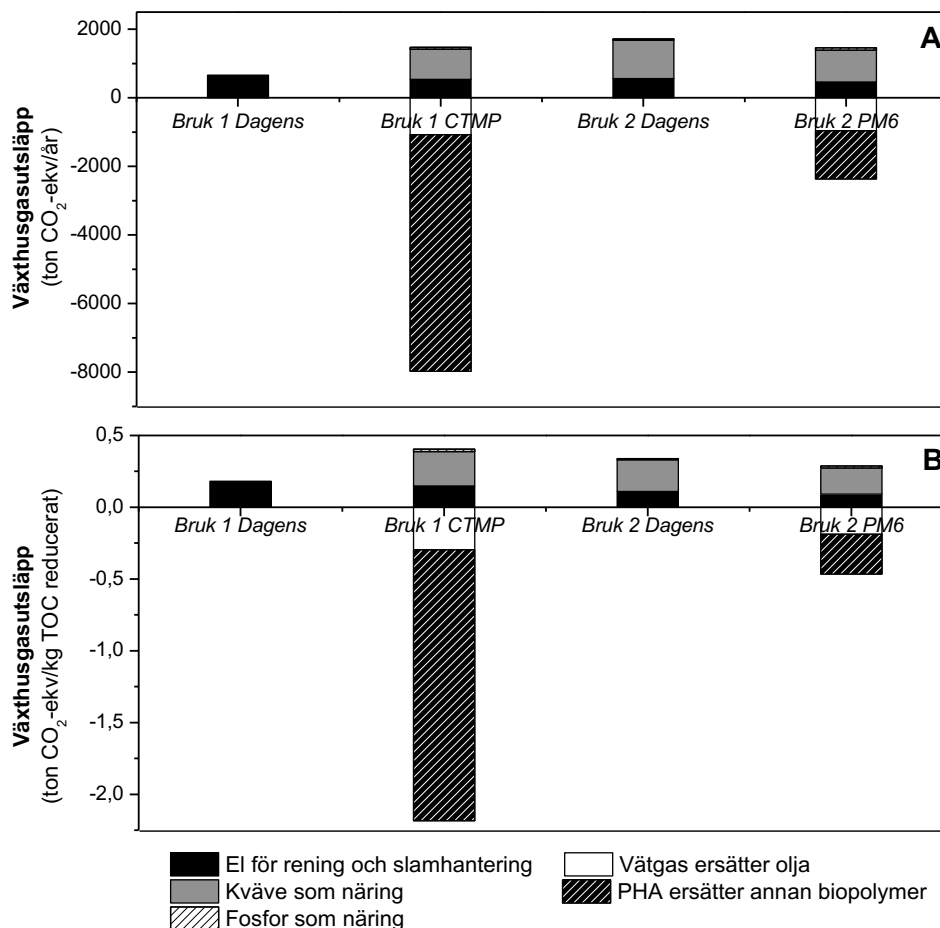
Livscykelanalys

De årliga utsläppen av växthusgaser beräknades för de två scenarierna (Bruk 1 med CTMP-ström och Bruk 2 med ström från PM6) med avseende på dagens situation samt för fallen då den biotekniska kaskadprocessen har implementerats för respektive delström. Resultaten visas i Figur 6A. Indata till livscykelanalysen återfinns i Bilaga 1.

För Bruk 1 skulle utsläppen i form av CO₂-ekvivalenter minska med 7160 ton/år vid användning av CTMP-avloppet till kaskadprocessen. Motsvarande minskning för Bruk 2 vore 2620 ton CO₂-ekv/år vid användning av PM6-avloppet (Figur 6A). Kaskadprocessens positiva effekt i livscykelanalysen är en följd av att PHA och vätgas förväntas ersätta andra produkter därmed undvika utsläpp förknippade med dessa. PHA från kaskadprocessen förväntas ersätta den PHA som är tillgänglig idag, producerad av renkulturer. De utsläppen som på så sätt undviks från denna produktionsprocess härstammar från produktion och bearbetning av en raffinerad råvara i form av socker, produktion av PHAn genom fermentering under i övrigt sterila förhållanden samt utvinning av polymeren. Även om undvikandet av sådana utsläpp ger stort genomslag i föreliggande livscykelanalys, är det värt att notera att konventionella fossilbaserade polymerer orsakar än större utsläpp än PHA från renkulturer. Vätgas förväntas i dessa beräkningar ersätta olja som bränsle.

De specifika växthusgasutsläppen med hänsyn till studiens funktionella enhet visas i Figur 6B. Den totala minskningen av TOC var 10 ton/dygn vid Bruk 1 och 13.9

ton/dygn för Bruk 2. Eftersom olika mängder av TOC reducerades i de olika alternativen skiljer sig resultaten jämfört med utsläpp per år (Figur 6A). Vid Bruk 1 minskar utsläppen vid användning av kaskadprocessen med 1,96 kg CO₂-ekv/kg TOC reducerat och vid Bruk 2 minskar de med 0,52 kg CO₂-ekv/kg TOC reducerat.



Figur 6. Utsläpp av växthusgaser för de olika enheterna som utvärderas med E-LCA för Bruk 1 referensfall (dagens situation) och när CTMP-avlopp leds till kaskadprocessen samt Bruk 2 referensfall och när PM6 leds till kaskadprocessen. Utsläpp av växthusgaser på år (A) och per ton TOC reducerat (B).

Det bör noteras att värmen för att driva vätgasprocessen termofilt förutsattes vara fritt tillgänglig spillvärme från respektive bruk. Tillgången till mängden spillvärme bör undersökas lokalt vid bruken. Alternativa värmekällor bör annars beaktas liksom möjligheterna till en lägre driftstemperatur.

Eftersom de produkter som beaktades vid systemgränsen var avvattnad PHA-rik biomassa från PHA-processen och rågas från biovätgasprocessen måste det även beaktas att förädlingen av dessa produkter kräver insats av resurser vilket diskuteras närmare nedan.

Framtida E-LCA-analyser som utförs av rapportens författare kommer inkludera mer osäkerhets-, känslighets-, och variationsanalyser. Effekterna av använda restslam från vätgasprocessen som proteinrik foderingsrediens till fiskodling och andra användningsområden för vätgas och PHA kommer att undersökas.

Hållbarhetsanalys

Enligt hållbarhetsanalysen framkom att en omställning till ny reningsteknik med det föreslagna bioteknik kaskaden kommer att få många positiva effekter (Tabell 6). Biopolymeren PHA producerad av blandkulturen i bioslam kan byta ut fossila polymerer och därmed minska ackumulering av fossila kolväten i naturen. PHA kan användas för att tillverka biologiskt nedbrytbar plast och bidra till att minska ett av vår tids störst miljöproblem; Anrikning av plast i hav och mark. Den bildade vätgasen kan med fördel byta ut fossil olja i exempelvis mesaugnar eller andra pannor där man idag använder olja.

Tabell 6. Sammanfattning av hållbarhetsanalysen.

	Hållbarhets-aspekt	Beskrivning av hur projektet ska hantera hållbarhetsaspekten
Positiva hållbarhets-aspekter	Biopolymeren PHA kan ersätta fossila och icke nedbrytbara polymerer	
	Vätgas kan ersätta olja med minskade utsläpp av växthusgaser	
	Mindre användning av näringsämnen och el-energi i reningsverket	
Risker	Vätgas utgör en olycksrisk	Bruken har tidigare använt vätgas och har därför vana att arbeta med farliga processer och material
	Om vätgas ska produceras termofilt behövs stort tillskott av restvärme.	Bruket har fortfarande stort överskott av lågvärdig värme. I nästa projekt behöver tillgången till restvärme och/eller möjligheten att producera vätgas vid lägre temperatur utvärderas noggrannare.
	För att extrahera PHA ur biomassan används lösningsmedel	Sträva efter att använda lösningsmedel eller andra metoder med liten miljöpåverkan

För övrigt kommer det föreslagna processen inte att påverka möjligheten att upprätthålla mänskliga rättigheter. Hittills har diskussionerna endast hållits med svenska bruk och företag vilka lyder under svenska arbetsmiljölögnstiftning.

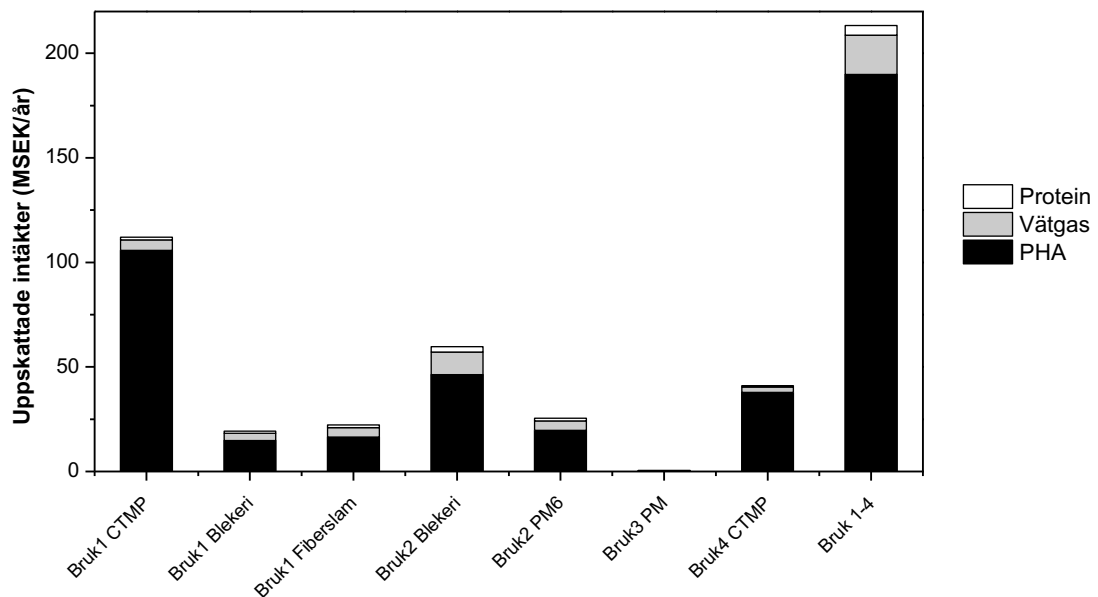
Inte heller jämställdheten förväntas påverkas i någon märkbar utsträckning av processen. Möjligtvis är kvinnliga ingenjörer bättre representerade vid projekt som har anknytning till miljöteknik och i så fall skulle processen kunna leda till en mer jämställd situation i industrin. Övriga resultat återfinns i Bilaga 2.

Affärsanalys

Intäkter och kostnadsberäkningar

De potentiella mängder av produkter som bruken kan producera genom den föreslagna kaskadprocessen representerar en betydande mängd intäkter. De uppskattade intäkterna vid användning av respektive delström är illustrerade i Figur 7. För de olika bruken varierade de uppskattade intäkterna i ett brett intervall mellan 0,5 och ca 100 MSEK/år. Ifall samtliga av de fyra bruken skulle använda kaskadprocessen för en av sina vardera delströmmar, skulle den sammanlagda potentiella intäkten vara ca 200 MSEK/år. Detta scenario innebär att följande strömmar skulle användas: CTMP-strömmen från Bruk 1, blekeriströmmen från Bruk 2, PM5-strömmen Bruk 3 och CTMP-strömmen från Bruk 4.

Enligt intäktsanalysen skulle PHA stå för nästan 90 % av de totala intäkterna och den resterande delen från biovätgas. Det betyder att mängden PHA som produceras i processen och dess marknadspris kommer att ha störst effekt på de totala intäkter som genereras. I jämförelse kommer intäkterna att påverkas något mindre av förändringarna i försäljningspriserna för vätgas och protein. Användning av biomassan producerad i vätgasprocessen som proteinrik foderingsrediens istället för bränsle, skulle bidra med uppskattade intäkter i storleksordningen 5 MSEK/år i det kombinerade scenariot ovan med samtliga bruk. För både PHA och vätgas råder en ovisshet angående det framtida marknadsvärdet, som beror på såväl produkternas egenskaper och användningsområden som marknadens utveckling. Prisnivåer som bedömts långsiktigt realistiska efter diskussioner med marknadens aktörer har använts för beräkningarna. Känsligheten för prisnivåer på de uppskattade intäkterna är närmare analyserad i Bilaga 3.



Figur 7. Intäktsuppskattningar för kaskadprocessen med användning av specifika strömmar från bruken och totala intäkter från ett kombinerat scenario där en delström från varje bruk 1-4 skulle användas.

En analys av de faktorer som kan påverka kaskadprocessens kostnader utfördes. Syftet var att definiera vilka områden närmare undersökningar krävs för att så småningom kunna göra uppskattningar av såväl CAPEX som OPEX.

För PHA-processen:

- Tidigare uppskattning tyder på att CAPEX och OPEX för en process för produktion av PHA med bioslam kan vara i storleksordningen 6 respektive 8 SEK/kg PHA (Bengtsson et al., 2017b).
- Tidigare uppskattning tyder på att vid tillräckligt stor skala kan CAPEX och OPEX för processen för utvinningen av PHA från bioslam vara i storleksordningen 7 respektive 11 SEK/kg PHA (Bengtsson et al., 2017b).
- Dessa kostnadsuppskattningar är baserade på pilotstudier och teknikutveckling pågår redan för att optimera dessa processer för minskade kostnader.

För vätgasprocessen:

- Tillgång till rikliga mängder överskottsvärme är en ekonomisk förutsättning ifall vätgasprocessen ska drivas vid 70°C. I annat fall bör en lägre driftstemperatur utvärderas.

- En preliminär uppskattning av reaktorkostnader exklusive kringutrustning resulterade i CAPEX på ca 1 SEK/kg H₂ producerad (15 års avskrivning och 5 % ränta).
- Bioprocessen och dess driftsstrategi bör utvecklas och anpassas för aktuell ström för att närmare klargöra vilken reaktordesign och tilläggsutrustning (pumpar, centrifug, rörsystem m.m.) som ska ligga till grund för en noggrannare CAPEX-beräkning.
- Behovet av näringstillsetser i processen motsvarade ca 15 SEK/kg H₂ i OPEX baserat på tidigare laboriestudier men förväntas kunna minska avsevärt vid optimering.
- Kostnaden för uppgradering av rågasen från biovätgasprocessen till ren vätgas behöver inkluderas. Detta är en etablerad process som har likheter med uppgradering av rå biogas till fordonsgas.

Trots att samtliga kostnader i dagsläget inte kan bestämmas gjordes den övergripande bedömningen att det finns goda möjligheter att kaskadprocessen genererar produkter som har ett marknadsvärde som med marginal överstiger kostnaderna för att implementera och driva de olika delprocesserna. Särskilt då även minskade kostnader för luftning, närsaltdosering och slamhantering inkluderas. Framöver bör mer detaljerade kostnadsberäkningar genomföras samtidigt som processalternativen vidareutvecklas tekniskt med lönsamhet i fokus.

Aktörsanalys

Femton olika aktörer har intervjuats angående deras intresse att stödja och fortsätta samarbeta inom beskrivna projektområde samt deras potentiella roll i ett framtida projekt. Baserat på denna studie har antalet produkter utökats till att också inkludera utvärdering av möjligheten att odla fisk med proteiner som producerats i processen som foderingrediens. Av dessa identifierade aktörer har elva åtagits sig att utveckla konceptet vidare genom sitt påskrivande av "Partners medgivande" för projektet MultiBio (närmare beskrivet under Genomförande ovan). I Tabell 7 finns de olika aktörerna beskrivna. Det är värt att notera att de verkligen bidrar med en kompletterande kompetens och att intresset från de största behovsägarna, dvs. bruken är så stort. De industriella partnerna stödjer projektet med såväl sin tid, material och kunskap som rent finansiellt.

Förutom bruken har diskussioner först med Preem, som är en behovsägare av grön vätgas. Intresset för projektet finns och Preem var också med på ansökan till Vinnova. Men på grund av förflyttning av personer inom Preem har man inte skrivit på någon Projektmedgivande i detta läger. Kontakt med Preem är dock etablerad och diskussioner kommer föras under projektets gång. För applikationer av bioplast har bruken själva ett preliminärt intresse. Men förutom bruken har också kontakts tagits med Gaia Biomaterials för intresset av framtida kommersialisering av

bioplasten som framställs i processerna. Diskussionerna är dock så initiala att ingen konkret kan tas upp i denna rapport.

Diskussioner inom projektgruppen för föreliggande projekt om juridiska frågor som tillgång till projektresultat och bakgrundsinformation samt reglering för publikationer har lett fram till projektavtal. Dessa projektavtal är en förenklad version av DESCAs översatt till svenska. Avtal som använts i föreliggande projekt kommer diskuteras med konsortiet för MultiBio och användas som avtal för att både stimulera exploatering och publicering av projektresultat.

Tabell 7. Aktörer knutna till en fortsatt utveckling av kaskadprocessen.

Typ av aktör	Aktör	Beskrivning	Roll i framtida MultiBio projekt
Behovsägare	Stora Enso	Industri Bruk	Leverera och analysera processvatten samt delta i utvecklande av affärsområde för MultiBio koncept på bruket.
	Rottneros		
	Billerud Korsnäs		Ge feedback på användning av bioplast och biovätgas inom bruket och intresse för att producera dessa i framtiden
	Drinor	SMF, Utvecklare fiberpress	Leverera och analysera pressvatten
Behovsägare/ teknikutvecklare	Scandinavian Aquasystem	SMF Fiskodlare	Kommer använda protein från processen för att odla fisk i deras odlingsanläggning.
	Fortum Waste Solution	Avfallsbolag	Bidra till affärsområdet genom att bidra med kunskap i teknikutvecklingen och i framtiden kunna diskutera/erbjuda denna lösning med/för bruk med slamavfallsproblematik runt om i landet
Konsult, FoU och teknikutveckling	Promiko	Konsult SMF	Bidrar till teknik-utveckling för uppskalning av acidogena fermentering, bioplast och vätgas.

Tabell 7 (fortsättning).

Forskare	RISE	Forskningsinstitut	Koordinerar och leder anpassningen och uppskalningen av biovätgasprocessen
	KAU	Universitet	Bidrar med kunskap om bruken, beräkning av miljöeffekter och förståelse av hur de nya processerna effektivt kan integreras med nuvarande infrastruktur generellt.
	SLU		Bidrar till formuleringen och utvecklingen av protein till fiskfoder
	LTH		Bidrar till utvecklingen och förståelsen för biovätgasprocessen
Kommunikatör och disseminerings expert	Paper Province	Klusterledare	Bidrar till dissemineringen och exploateringen av projektresultat. Bidrar även till behovsförståelse och kunskap om industriell symbios i Paper Province.

Diskussion: Möjligheter och begränsningar för produktion av PHA och vätgas från skogsindustriella restströmmar

Beräkningarna i denna studie har visat att genom att använda en delström till kaskadprocessen för produktion av PHA och vätgas, skulle ansevärliga mängder av dessa produkter kunna genereras. För tre av de fyra bruken var de uppskattade mängderna 800 - 2000 ton/år PHA och 50 - 200 ton/år vätgas.

Den ekonomiska analysen visade att PHA står för den största delen av de förväntade intäkterna från PHA och vätgas, och kan därför förväntas vara drivkraften bakom en implementering av kaskadprocessen. Processen för PHA-produktion har också en högre teknisk mognadsgrad då den demonstrerats i pilot- och delvis fullskala. Den VFA som behövs för PHA-produktion kan produceras med väletablerad teknik (acidogen fermentering) som redan idag används i stor skala. Den acidogena fermenteringen kan även drivas under förhållanden som gynnar vätgasproduktion. Det ter sig därmed logiskt att en strategi för implementering av kaskadprocessen i första hand fokuserar på produktion av PHA och den VFA som krävs för detta. I andra hand kan vätgasproduktion integreras i processen genom att VFA-produktionen sker på ett sådant sätt att även vätgas bildas. I detta läge kan en termofil process baserad på *C. saccharolyticus* vara ett alternativ, men det finns också andra möjliga vägar.

Den antagna temperaturen för att gynna vätgasproduktion (70°C) ledde till ett stort behov av värme. Detta värmebehov är inte nödvändigt för produktion av PHA och kan eventuellt minskas även vid vätgasproduktion. För att produktion av vätgas vid termofila förhållanden ska vara attraktiv är det sannolikt nödvändigt att denna värme finns tillgänglig som spillvärme från bruket. Produktion av den VFA som behövs för PHA-produktion kan ske vid strömmarnas nuvarande temperatur. Det stora värmebehovet visar också att möjligheterna att driva en vätgasprocess vid lägre temperatur bör utvärderas. Det är fullt möjligt att driva en process för biologisk vätgasproduktion vid en lägre temperatur och på så sätt minska eller helt eliminera uppvärmningsbehovet. En lägre temperatur kan dock innebära ett lägre utbyte av vätgas vilket kan vara en rimlig kompromiss. Även om spillvärme finns tillgänglig kan det vara mer attraktivt att driva vätgasproduktionen vid en lägre temperatur och därmed göra mer spillvärme tillgänglig för andra behov nedströms i kaskadprocessen, såsom torkning av PHA-rikt bioslam och utvinning och bearbetning av PHA.

Det har noterats i denna studie att vilken typ av delström som används till kaskadprocessen påverkar den förväntade effekten på flera olika sätt. Belastningen från en delström (ton TOC/år) har en direkt påverkan på de potentiella mängderna av produkterna. Sammansättningen på den delström som används har också en stor påverkan på mängderna och förhållandet mellan de två produkterna. Som visats ovan leder användning av strömmar från CTMP-tillverkning till mer PHA i förhållande till vätgas än de andra typerna av strömmar, eftersom CTMP-strömmar redan innehåller relativt mycket flyktiga fettsyror. Även koncentrationerna av det

organiska materialet (g/l TOC) har betydelse. Högre koncentrationer kan leda mer kompakta bioprocesser, både för produktion av PHA, och för produktion av VFA med vätgas.

De procesströmmar som identifierats måste framöver även utvärderas experimentellt för att fastställa att de lämpar sig för respektive processteg. Bioslam från de befintliga vattenreningsprocesserna bör utvärderas för deras förmåga att ackumulera PHA. Det är inte ovanligt att denna förmåga redan finns i befintliga anläggningar. I annat fall är det normalt möjligt att öka förmågan med relativt små förändringar i den processen. De strömmar som uppskattades ha stor potential bör testas laborativt, både med avseende på produktion av VFA och vätgas. På så sätt kan mängderna av PHA, VFA och vätgas som kan produceras fastställas. Det kan också säkerställas att strömmarna inte innehåller inhiberande ämnen eller att dess effekt kan minimeras. Optimering och anpassning av bioprocesserna för de aktuella strömmarna bör utföras. Vidare behövs utvärdering av produkternas kvalitet och egenskaper. Baserat på denna information kan lämpliga produkter utvecklas samtidigt med ekonomiska modeller den nya verksamheten med målet att gynna en regional bioekonomi med synergi mellan etablerad skogsindustri och ny produktutveckling.

Innehållet av PHA i bioslammet efter PHA-produktionsprocessen (kg PHA per kg organisk torrsvikt) är en viktig egenskap där ett högre innehåll innebär en mer ekonomisk utvinning av PHA och ett högre totalt utbyte. I denna studie har antagits att 60 % PHA kan uppnås vilket ligger i linje med vad som tidigare uppnåtts i studier i laboratorie- och pilotskala (Anterrieu et al., 2014; Bengtsson et al., 2008; Jiang et al., 2012). Det PHA-rika bioslammet som bildas förtjockas och avvattnas. I denna studie antogs att sådant PHA-rikt bioslam med 25 % torrhalt vara slutprodukten vid systemgränsen.

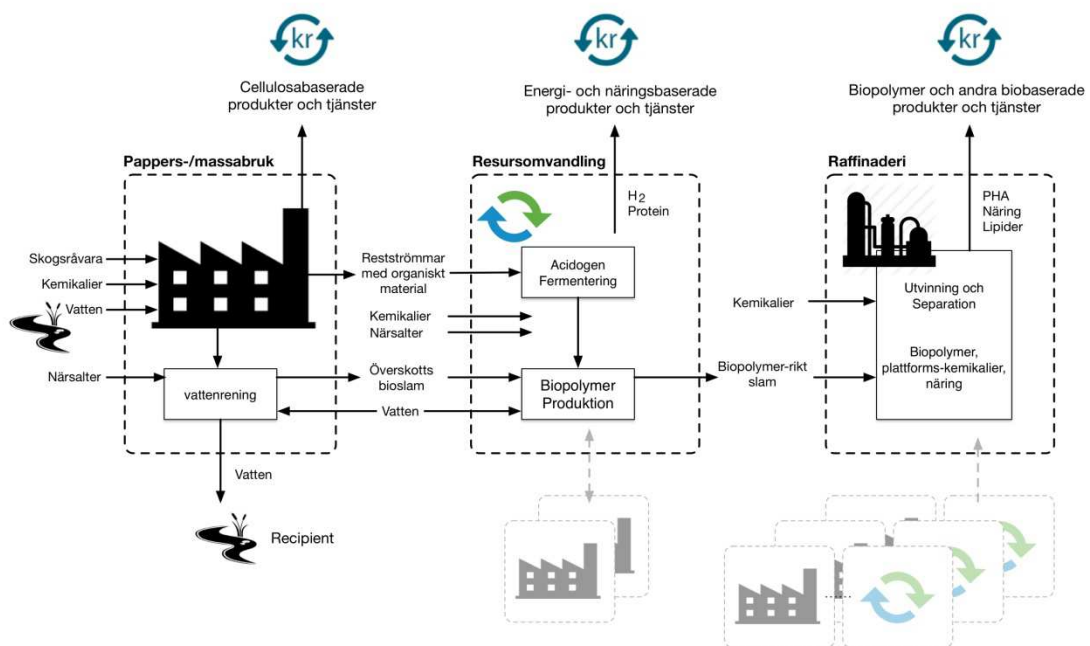
Från det PHA-rika bioslammet behöver PHA utvinnas genom att den separeras från övrigt cellmaterial i mikroorganismerna i bioslammet. Därefter erhålls en nästintill ren PHA som kan blandas och bearbetas vidare till en bioplastprodukt. Deltagare i denna studie har tidigare utvecklat en process för utvinning av PHA från bioslam och skalat upp denna till pilotskala. Denna process är baserad på att bioslammet först torkas och att PHA sedan extraheras med ett organiskt lösningsmedel som t.ex. butanol (Bengtsson et al., 2017b). Restslammet som blir en biprodukt från denna utvinningsprocess är torrt och har därför ett högt värmevärde samtidigt som det kan lämpa sig för utvinning av näring (N och P) och lipider.

Vidareutveckling av processer för utvinning av PHA pågår och metoder som blir ekonomiskt hållbara vid en mindre skala förväntas framöver. Beroende på denna osäkerhet valdes den aktuella systemgränsen vid PHA-rikt bioslam och vidare utvinning och bearbetning lämnades utanför en närmare analys. Det är därför viktigt att beakta att de miljömässiga effekterna av kaskadprocessen är uppskattade utan den påverkan som investering i och drift av utvinningsprocessen innebär. De miljömässiga fördelarna med kaskadprocessen som visats ska därför ses i ljuset av

att det PHA-rika bioslammet kräver resurser nedströms för att upprätta infrastruktur och drift för utvinning av PHAn. Detsamma gäller uppgradering av rågasen från vätgasprocessen till ren vätgas som också kräver resurser. Mer fallspecifika och detaljerade studier krävs för att inkludera fler aspekter i dessa analyser såsom utvinning av PHA och uppgradering av rågasen från biovätgasprocessen.

I relation till respektive bruks huvudprodukter är samtidigt de potentiella mängderna små. Produkterna kan vara användbara för bruken internt, PHA som komponent i produkter i form av bstrykning eller kompositer och vätgas som reduktionsmedel eller bränsle. Det kan också vara attraktivt att kaskadprocessen hanteras av en utomstående aktör i en industriell symbios vilket visas i Figur 8. Med ett sådant upplägg skulle den utomstående, närliggande aktören ta emot en delvattenström och överskottsbioslamm från bruket. Då minskar belastningen på brukets processvattenrening vilket t.ex. kan möjliggöra produktionsökning utan att processvattenreningen behöver utökas samtidigt som behovet av hantering och kvittblivning av slam minskar. Den utomstående aktören kan utveckla en verksamhet kring råvarorna från brukets rester och även utnyttja dess spillvärme om sådan finns att tillgå. På så sätt skapas en synergi i form av industriell symbios där båda parter kan ha nytta av varandra.

För att starta en implementering kan det vara lämpligt med en mindre produktionskala än den uppskattade potentialen vilken sedan efterhand kan utökas. För att minimera risken i ett startskede kan det också vara attraktivt att använda en råvara vars hantering inte påverkar befintlig verksamhet på ett kritiskt sätt. Därför bör möjligheterna att använda fiberslam särskilt beaktas och undersökas. Den uppskattade potentialen för PHA producerad från fiberslam vid Bruk 1 (370 ton/år) vore mer än nog för att starta en mindre nisch-produktion med syfte att utveckla produkter och tillämpningar för långsiktig verksamhet. Med tanke på att fiber i sig är intressanta för kompositmaterial kan PHA-fiber-komposit vara en, av flera, tänkbara tillämpningar.



Figur 8. Ett möjligt upplägg för industriell symbios där kaskadprocessen hanteras av en aktör som skapar värdefulla produkter baserade på bland annat biopolymerer och vätgas från restströmmar från skogsbruken.

Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Det skulle vara möjligt att producera ansevära mängder PHA och vätgas från skogsindustriella restströmmar med den föreslagna kaskadprocessen. Uppskattningarna visar att potentialen för tre av de fyra bruken som studerades var, var för sig, 800 - 2000 ton/år PHA och 50 - 200 ton/år vätgas. Marknadsvärdet på dessa produkter är 40 - 100 miljoner SEK/år vid vart och ett av dessa tre bruk.

Genom omvandling av de organiska föroreningarna till PHA och vätgas minskar belastningen på befintliga reningsverk med en samtidig minskning av bioslamsproduktion, näringsbehov och elanvändning för luftning. Förbränning av bioslam ger ett visst tillskott av värme, men även om detta tillskott skulle minska bedöms kaskadprocessen innebära en överlag positiv effekt för slamhanteringen vid bruken.

Fiberslam identifierades som en intressant råvara för kaskadprocessen på kortare sikt eftersom den skulle kunna innebära att konceptet initialt skulle kunna testas utan risk för påverkan på befintlig processvattenrening. Ett lämpligt sätt att påbörja en implementering kan också vara att fokusera på PHA-produktion som är en relativt sett, mer mogen teknik, och på den omvandling av organiskt material till VFA som krävs för PHA-produktion. VFA-produktionen kan sedan efterhand optimeras mot samtidig vätgasproduktion.

Vid beräkningarna antogs produktionen av vätgas ske termofilt vid 70°C vilket skulle medföra ett stort behov av tillsatt värme. En sådan processtemperatur förutser att det finns överskottsvärme tillgänglig vid bruket. Ett alternativ är att driva vätgasprocessen vid en lägre temperatur med en något lägre utbyte av vätgas som följd.

En förenklad livscykelanalys med fokus på förändring av utsläpp av klimatgaser, visade att de miljömässiga fördelarna med att omvandla organiskt material till vätgas och PHA är stora jämfört med dagens situation. Utsläppen av CO₂-ekvivalenter minskar väsentligt om kaskadsystemet används. En stor del av detta beror på att PHA förväntas ersätta andra material som orsakar högre utsläpp av CO₂-ekvivalenter. Dock måste det beaktas att utvinning och bearbetning av PHA nedströms kaskadprocessen förbrukar resurser med miljöpåverkan.

En implementering av kaskadprocessen skulle kunna möjliggöra en industriell symbios där en extern aktör tar hand om en delström från ett bruk och driver omvandlingen av rester till produkter. En synergi skapas då så att bruket åtnjuter avlastning på sin befintliga processvattenbehandling samtidigt som en ny verksamhet kan utvecklas och stimulera en regional cirkulär bioekonomi.

Framtida undersökningar bör inkludera experimentella utvärderingar av delprocesserna för att bekräfta utbyten och antaganden samt utveckla optimala processtrategier. Detta kan initialt ske i laboratorieskala varefter uppskalning kan ske, framförallt av vätgasprocessen som inte tidigare utvärderats i större skala. Under detta projekt har ytterligare ett antal aktörer knutits till projektgruppen och gemensamt åtagits sig att utveckla konceptet vidare. Detta kan tänkas ske i flera olika projekt och ett av dessa (MultiBio) kommer att starta tidigt under 2018. Föreliggande studie ger värdefull vägledning till en mer experimentell utveckling mot ett framtida större utnyttjande av skogsindustriella restströmmar för nya produkter som bidrar till en cirkulär bioekonomi.

Publikationslista

Sandberg, M. et al. 2017. Unique biotechnical cascade concept to upgrade pulp and paper residues to hydrogen gas and polyhydroxyalkanoate (PHA). Poster at "EcoBio: Challenges in Building a Sustainable Biobased Economy 2018", 4–7 Mars 2018, Dublin, Irland.

Projektkommunikation

Projektet har kommunicerats till media via ett pressmeddelande som har skickats till 190 kontakter (mestadels olika media), nyhetsbrev som når ung. 1000 mottagare samt Paper Province hemsida. Det är minst en tidning, ett magasin och åtta andra mediakanaler som skrivit om projektet på sin hemsida enligt tabell 8.

Tabell 8: Platser projektet har kommunicerats på

Date	Name	Media	Spridning
2017-10-09	Recyclingnet	Webb	Nationell
2017-10-09	Nordisk Bioplastförening	Webb	Nationell
2017-10-09	PACKMarknaden	Webb	Nationell
2017-10-09	Plastforum	Webb	Nationell
2017-10-10	Packnyheter	Webb	Nationell
2017-10-10	Transport och Logistik	Webb	Nationell
2017-10-10	PapperochMassa	Webb	Nationell
2017-10-16	VF	Newspaper	Regional
2017-11-08	Plastforum	Magazine	Nationell
2017-11-22	BioInnovation	Webb	Nationell

Projektet har också presenterats på några av Paper Province arrangemang såsom Energiträff (15 st), Testbäddsmöte (20 st) och Forskarvernissage (51 st). Vid det sistnämnda presenterades forskningen såsom ett konstverk tillsammans med andra verk. Deltagarna på dessa träffar har framförallt varit representanter från regionala företag, men också andra forskare från bl.a. Karlstads universitet.

Referenser

- Akiyama, M., Tsuge, T. and Doi, Y. 2003. Environmental life-cycle comparison of polyhydroxyalkanoate produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. *Polymer Degradation and Stability*, 80: 183-194.
- Anterrieu, S., Quadri, L., Geurkink, B., Dinkla, I., Bengtsson, S., Arcos-Hernandez, M., Alexandersson, T., Morgan-Sagastume, F., Karlsson, A., Hjort, M., Karabegovic, L., Magnusson, P., Johansson, P., Christensson, M., Werker, A., 2014. Integration of biopolymer production with process water treatment at a sugar factory. *N. Biotechnol.* 31, 308–323. doi:10.1016/j.nbt.2013.11.008
- Balat, M., 2008. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(15): p. 4013-4029.
- Bengtsson, S., Karlsson, A., Alexandersson, T., Quadri, L., Hjort, M., Johansson, P., Morgan-Sagastume, F., Anterrieu, S., Arcos-Hernandez, M., Karabegovic, L., Magnusson, P., Werker, A., 2017a. A process for polyhydroxyalkanoate (PHA) production from municipal wastewater treatment with biological carbon and nitrogen removal demonstrated at pilot-scale. *N. Biotechnol.* 35, 42–53. doi:10.1016/j.nbt.2016.11.005
- Bengtsson, S., Werker, A., Christensson, M., Welander, T., 2008. Production of polyhydroxyalkanoates by activated sludge treating a paper mill wastewater. *Bioresour. Technol.* 99, 509–516. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.020
- Bengtsson, S., Werker, A., Visser, C., Korving, L., 2017b. PHARIO - Stepping stone to a value chain for PHA bioplastic using municipal activated sludge. STOWA Report No. 2017-15.
- Chan, C.M., Vandi, L.-J., Pratt, S., Halley, P., Richardson, D., Werker, A., Laycock, B., 2017. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review. *Polym. Rev.* In press. doi:10.1080/15583724.2017.1380039
- de Vrije, T., et al., 2009. Efficient hydrogen production from the lignocellulosic energy crop *Miscanthus* by the extreme thermophilic bacteria *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and *Thermotoga neapolitana*. *Biotechnol Biofuels*, 2(1): p. 12.
- de Vrije, T., et al., 2010. Hydrogen production from carrot pulp by the extreme thermophiles *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and *Thermotoga neapolitana*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(24): p. 13206-13213.
- Demirel, B. and Yenigün, O., 2002. Two-phase anaerobic digestion processes: a review. *J Chem Technol Biotechnol.* 77: 743–755.
- Gerngross, TU. 1999. Can biotechnology move us towards a sustainable society. *Nature Biotechnology*, 17:541-544.
- Gurieff, N. and Lant, P. 2007. Comparative life-cycle assessment and financial analysis of mixed-culture polyhydroxyalkanoate production. *Bioresource Technology*, 98: 3393-3403.
- Harding, K.G., Dennis, J.S., von Blottnitz, H. and Harrison, S.T.L. 2007. Environmental analysis of plastic production processes: comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly-β-

- hydroxybutyric acid using life-cycle analysis. *Journal of Biotechnology*, 130: 57-66.
- Heimersson, S., Morgan-Sagastume, F., Peters, G.M., Werker, A. and Svanstrom, M. 2014. Methodological issues in life-cycle assessment of mixed-culture polyhydroxyalkanoate production utilising waste as feedstock. *New Biotechnology*, 31(4): 383-393.
- Hänggi, U.J., 1995. Requirements on bacterial polyesters as future substitute for conventional plastics for consumer goods. *FEMS Microbiol. Rev.* 16, 213–220.
- Ingersoll, J.G., 1996. *Natural gas vehicles.*, Lilburn, GA; Upper Saddle River, NJ: Fairmont Press ; Distributed by Prentice Hall PTR. xiii, 468 p.
- International Energy Agency (IEA). <http://www.iea.org/statistics>; 2017. Hämtad 20 november 2017.
- ISO 14040. 2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and framework. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- ISO 14044. 2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and scope definition, Inventory Analysis, Impact Assessment and Interpretation. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- Ivanova, G., G. Rákhely, and K.L. Kovács, 2009. Thermophilic biohydrogen production from energy plants by *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and comparison with related studies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9): p. 3659-3670.
- Jacquel, N., Lo, C.-W., Wei, Y.-H., Wu, H.-S., Wang, S.S., 2008. Isolation and purification of bacterial poly (3-hydroxyalkanoates). *Biochem. Eng. J.* 39, 15–27. doi:10.1016/j.bej.2007.11.029
- Jiang, Y., Marang, L., Tamis, J., van Loosdrecht, M.C.M., Dijkman, H., Kleerebezem, R., 2012. Waste to resource: converting paper mill wastewater to bioplastic. *Water Res.* 46, 5517–5530.
- Kengen, S.W.M., et al., 2009. Biological Hydrogen Production by Anaerobic Microorganisms, in *Biofuels.*, John Wiley & Sons, Ltd. p. 197-221.
- Keskitalo, J., Jansen, J. la C., Leiviska, K., 2010. Calibration and validation of a modified ASM1 using long-term simulation of a full-scale pulp mill wastewater treatment plant. *Environ. Technol.* 31, 555–566. doi:10.1080/09593330903563802
- Larsson, M., 2015. Anaerobic digestion of wastewaters from pulp and paper mills - A substantial source for biomethane production in Sweden. Linköping University, Department of Thematic Studies – Environmental Change.
- Lee, S.Y., 1996. Bacterial polyhydroxyalkanoates. *Biotechnol. Bioeng.* 49, 1–14.
- Ljunggren, M., O. Wallberg, and G. Zacchi, 2011. *Techno-economic comparison of a biological hydrogen process and a 2nd generation ethanol process using barley straw as feedstock.* *Bioresource Technology*, 102(20): p. 9524-9531.
- Ljunggren, M. and G. Zacchi, 2010. *Techno-economic analysis of a two-step biological process producing hydrogen and methane.* *Bioresource Technology*, 101(20): p. 7780-7788.

- Morgan-Sagastume, F., Heimersson, S., Laera, G., Werker, A. and Svanström, M. 2016. Techno-environmental assessment of integrating polyhydroxyalkanoate (PHA) production with services of municipal wastewater treatment, *Journal of Cleaner Production*, 137: 1368-1381
- Pawar, S.S. and E.W.J. van Niel, 2013. Thermophilic biohydrogen production: how far are we? *Applied Microbiology and Biotechnology*,. 97(18): p. 7999-8009.
- Pawar, S.S., et al., 2013. Biohydrogen production from wheat straw hydrolysate using *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* followed by biogas production in a two-step uncoupled process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22): p. 9121-9130.
- Pawar, S.S. and E.W.J. van Niel, 2014. Evaluation of assimilatory sulphur metabolism in *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Bioresource Technology*, 169(0): p. 677-685.
- Pietrini, M., Roes, L., Patel MK. and Chiellini, E. 2007. Comparative life-cycle studies on poly(3-hydroxybutyrate)-based composites as potential replacements for conventional thermochemical plastics. *Biomacromolecules*, 8:2210-2218.
- Pochon, M., Rouger, J., Junet, E., 1988. Anaerobic Treatment of Sulphur-Containing Effluents. *Water Sci. Technol.* 20, 133–141.
- Rintala, J.A., Puhakka, J.A., 1994. Anaerobic treatment in pulp- and paper-mill waste management: A review. *Bioresour. Technol.* 47, 1–18. doi:10.1016/0960-8524(94)90022-1
- Sandberg, M., 2017. Beräkningskompendium för Reningsteknik, Karlstads Universitet.
- Sequeira, C.A.C. and D.M.F. Santos, 2010. Hydrogen production. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*,. 22: p. 76-86.
- Stoica, A., Sandberg, M., Holby, O., 2009. Energy use and recovery strategies within wastewater treatment and sludge handling at pulp and paper mills. *Biores. Technol.* 100, 3497–3505
- Swiss Centre for Life-cycle Inventories (2017). Ecoinvent database, v3. Hämtad november 2017.
- Tamis, J., Lužkov, K., Jiang, Y., van Loosdrecht, M.C.M., Kleerebezem, R., 2014. Enrichment of *Plasticumulans acidivorans* at pilot-scale for PHA production on industrial wastewater. *J. Biotechnol.* 192 Pt A, 161–9. doi:10.1016/j.jbiotec.2014.10.022
- Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., Burton, F., 2014. *Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education, New York.
- Valentino, F., Karabegovic, L., Majone, M., Morgan-Sagastume, F., Werker, A., 2015. Polyhydroxyalkanoate (PHA) storage within a mixed-culture biomass with simultaneous growth as a function of accumulation substrate nitrogen and phosphorus levels. *Water Res.* 77, 49–63. doi:10.1016/j.watres.2015.03.016
- van de Werken, H.J.G., et al., 2008. Hydrogenomics of the Extremely Thermophilic Bacterium *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 74(21): p. 6720-6729.

- van Niel, E.W.J., P.A.M. Claassen, and A.J.M. Stams, 2003. Substrate and product inhibition of hydrogen production by the extreme thermophile, *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Biotechnol Bioeng*, 81(3): p. 255-62.
- Weisser D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 2007; 32(9): 1543-1549.
- Willquist, K., S.S. Pawar, and E.W.J. van Niel, 2011. Reassessment of hydrogen tolerance in *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Microbial Cell Factories*, 10(1): p. 111.
- Willquist, K., S.S. Pawar, and E.W.J. van Niel, 2011. *Reassessment of hydrogen tolerance in Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Microbial Cell Factories*, 10(1): p. 111.
- Willquist, K. and E.W.J. van Niel, 2012. Growth and hydrogen production characteristics of *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* on chemically defined minimal media. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6): p. 4925-4929.
- Zeidan, A.A., 2011. Hydrogen production by *Caldicellulosiruptor species* : The organism and the metabolism., *Applied Microbiology.*, Lund University, Sweden: Sweden.

Bilagor

1. Hållbarhetsanalys
2. Indata för LCA
3. Känslighetsanalys för affärsmodellen

Bilaga 1a. Hållbarhetsanalys

B. Identifiering av aspekter

Projektets namn	Ämnesöverskridande samverkansprojekt för nya biomaterial ur skogsindustriella restprodukter med biotekniska system i kaskad
Projektets effekt	Produktion av biovätsgas och PHA-polymer av skogsindustriella restprodukter
Jämförelseobjekt	Traditionell skogsindustriell reningsteknik med aeroba biologiska processer

Nedanstående aspekter skall betraktas i relation till jämförelseobjektet. Kommer projektets teknik eller metod innebära att det blir en signifikant förändring för någon aspekt? Aspekterna är uppdelade i fyra områden: **Miljömässig hållbarhet, Arbetsmiljö och hälsa, Mänskliga rättigheter samt Jämställdhet och mångfald.**

För mer information, läs kommentarer genom att peka på respektive aspekt!

Analys görs för alla delar av livscykeln: Råmaterial, Tillverkning, Användning, och Återvinning och resthantering.

Det är lämpligt att analysera **en livscykel** i taget, dvs tänk först igenom vilka aspekter det finns på materialförsörjningen, sen vilka aspekter det finns på tillverkningen osv.

Beskriv signifikanta aspekter i gula fält, risker såväl som positiva aspekter. OBS att det inte är tänkt att alla rutor ska fyllas i. Om signifikant aspekt saknas lämnas rutan tom.

Avsluta med att **sammanfatta!** Sammanfattningarna förs över automatiskt till FIR C.

Aspekt	Påverkan i livscykel			
	Råmaterial	Tillverkning	Användning	Återvinning och resthantering
Miljömässig hållbarhet				
Utsläpp till luft, klimatgaser inkl transporter			Vätgas byter ut olja i mesa-ugn, därför	
Utsläpp skadliga ämnen till luft, vatten, mark			Lösningsmedel behövs för att	
Uppkomst av farligt avfall				Lösningsmedel återvinns i processen.
Materialanvändning		Mindre förbrukning av näringsämnen	Biopolymeran kan byta ut annan fossil plast.	Biopolymeran PHA är biologiskt nedbrytbar och kommer därför inte att ackumuleras i naturen.
Energianvändning		Mer spillvärme, mindre elenergi	Mindre mängder bioslam kan brännas vilket leder till mindre värmproduktion.	När PHA har extraherats ut ur biomassan kan resterna brännas och producera värme.
Vattenanvändning				
Optimerad livslängd				
Förändrade eller återskapade ekosystem				
Buller, vibrationer, smitta, strålning, mm				
Sammanfattning för miljömässig hållbarhet	Med bioteknik-konceptet kommer inga nya kemikalier eller andra nya resurser att användas.	Förbrukningen av näringsämnen kommer att minska medan användningen av spillvärme kommer att öka. Om värmen inte har en användning idag har det ingen miljömässig påverkan.	Processavloppet kommer att bli lika rent eller eventuellt renare med bioteknik-kaskaden. När biovätsgas används istället för olja, minskar utsläpp av växthusgaser mm. Bruket kan producera mindre värme. När biopolymeran PHA används i stället för fossila polymerer kommer färre fossila kolväten att ackumuleras i recipienten. Det finns risk för miljöpåverkan beroende på vilken teknik/vilket lösningsmedel man använder för PHA.	Biopolymeran PHA är biologiskt nedbrytbar och minskar påverkan på miljön jämfört med fossil plast eller annan icke nedbrytbar plast med biologiskt ursprung. Lösningsmedel återvinns i processen. När PHA har extraherats ut ur biomassan kan resterna brännas och producera värme. I övrigt finns inga restprodukter.
Arbetsmiljö och hälsa				
Kemiska hälsorisker			Mindre hantering av bioslam minskar risken med svavelvätebildning, dålig lukt och giftigt i höga koncentrationer.	
Olycksfall		vätsgas kan vara explosivt	vätsgas kan vara explosivt, med ökad risk för olycksfall.	
Ergonomi				
Psykiska och sociala faktorer				
Sammanfattning för Arbetsmiljö och hälsa		Vätgas är explosivt, ökad risk för olyckor	Minskad risk för arbetsmiljöproblem p.g.a. mögel, svavelvätebildning mm i bioslam. Användning av explosiv vätgas medför risker för olyckor.	
Mänskliga rättigheter				
Korruption, markstöld, våld eller krig / värdekedjan				
Förbud mot fackföreningar i värdekedjan				
Barnarbete eller tvångsarbete i värdekedjan				
Sammanfattning för Mänskliga rättigheter		I projektet diskuteras en bioteknik process vid svenska bruk med svensk lagstiftning därför finns ingen risk för försämrade mänskliga rättigheter	I projektet diskuteras en bioteknik process vid svenska bruk med svensk lagstiftning därför finns ingen risk för försämrade mänskliga rättigheter	
Jämställdhet och mångfald				
Särbehandling av män och kvinnor				
Övrig diskriminering				
Sammanfattning för Jämställdhet och mångfald		Miljöprojekt kan locka kvinnliga ingenjörer i en annars ganska manlig arbetsmiljö.		

Råmaterial
spillvärme
sockerrik avloppsström

bioslam
kväve och fosfor

Reningsverk
vätsgasprocess
PHA-process

renat vatten
vätsgas i stället för Olja i mesaugn
extraktion av PHA ur PHARik biomassa
förbränning av bioslam inkl caldi-
biomassa

Förbränning av PHA-biomassa efter
extraktion

Bilaga 1b. Hållbarhetsanalys

C. Hantering i projektet

Projektets namn	Ämnesöverskridande samverkansprojekt för nya biomaterial ur skogsindustriella restprodukter med biotekniska system i kaskad
Projektets effekt	Produktion av biovätgas och PHA-polymer av skogsindustriella restprodukter
Jämförelseobjekt	Traditionell skogsindustriell reningsteknik med aeroba biologiska processer

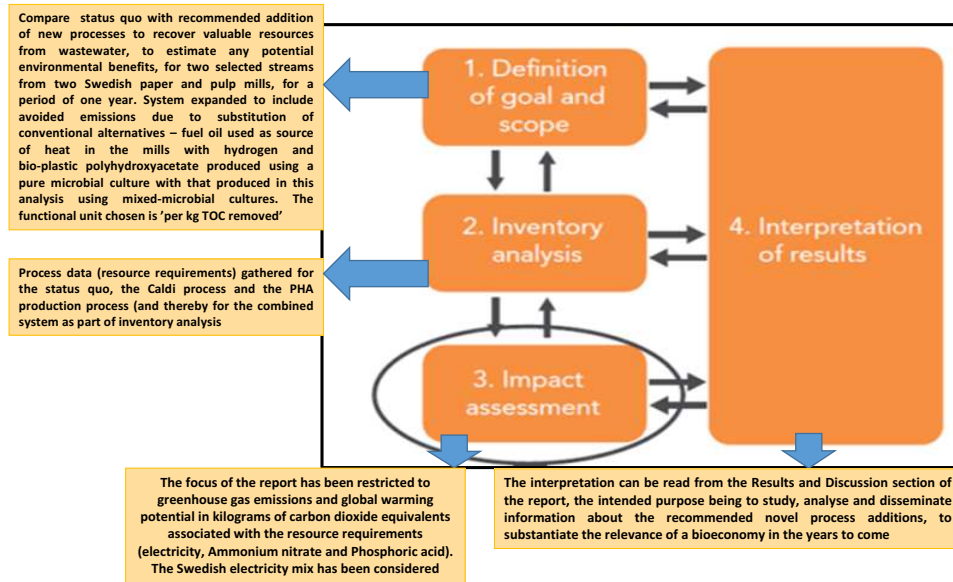
Nedan ges en sammanfattande bedömning av projektets signifikanta hållbarhetsaspekter i relation till jämförelseobjektet i ett livscykelperspektiv. Såväl positiva aspekter som risker beskrivs. Tom ruta innebär att ingen signifikant aspekt identifierats. Sammanfattningen fylls i delvis automatiskt och ger en snabb överblick.

	Råmaterial	Tillverkning	Användning	Återvinning och resthantering
Miljömässig hållbarhet	Med bioteknik-konceptet kommer inga nya kemikalier eller andra nya resurser att användas.	Förbrukningen av näringsämnen kommer att minska medan användningen av spillvärme kommer att öka. Om värmen inte har en användning idag har det ingen miljömässig påverkan.	Processavloppet kommer att bli lika rent eller eventuellt renare med bioteknik-kaskaden. När biovätgas används istället för olja, minskar utsläpp av växthusgaser mm. Bruket kan producera mindre värme. När biopolymeren PHA används i stället för fossila polymerer kommer färre fossila kolväten att ackumuleras i recipienten. Det finns risk för miljöpåverkan beroende på vilken teknik/vilket lösningsmedel man använder för PHA-extraktion.	Biopolymeren PHA är biologiskt nedbrytbar och minskar påverkan på miljön jämfört med fossil plast eller annan icke nedbrytbar plast med biologiskt ursprung. Lösningsmedel återvinns i processen. När PHA har extraherats ut ur biomassan kan resterna brännas och producera värme. I övrigt finns inga restprodukter.
Arbetsmiljö och hälsa	0	Vätgas är explosivt, ökad risk för olyckor	Minskad risk för arbetsmiljöproblem p.g.a. mögel, svavelvätebildning mm i bioslam. Användning av explosiv vätgas medför risker för olyckor.	0
Mänskliga rättigheter	0	I projektet diskuteras en bioteknik process vid svenska bruk med svensk lagstiftning därför finns ingen risk för försämrade mänskliga rättigheter	I projektet diskuteras en bioteknik process vid svenska bruk med svensk lagstiftning därför finns ingen risk för försämrade mänskliga rättigheter	0
Jämställdhet och mångfald	0	Miljöprojekt kan locka kvinnliga ingenjörer i en annars ganska manlig	0	0

Sortera aspekterna ovan, i positiva och i risker nedan, och beskriv hur projektet ska hantera respektive aspekt. Ta bort bladets skydd (under Granska) och lägg till fler rader för positiva hållbarhetsaspekter eller risker vid behov!

	Hållbarhetsaspekt	Beskrivning av hur projektet ska hantera hållbarhetsaspekten
Positiva hållbarhetsaspekter	Biopolymer PHA kan ersätta fossila och icke nedbrytbara polymerer	
	Vätgas kan ersätta olja med minskade utsläpp av växthusgaser	
	Mindre användning av näringsämnen och el energi i reningsverket.	
Risker	Vätgas utgör en olycksrisk. Behovet av värme kommer att öka samtidigt som bruket får mindre bioslam att elda som	Bruken har tidigare använt vätgas i mesaugnar och har vana och rutiner för att arbeta med farliga processer och material. Bruket har fortfarande stort överskott av lågvärldig värme. I nästa projekt får möjligheten att producera nödvändig värme utvärderas ytterligare.
	För att extrahera PHA ur biomassan används lösningsmedel.	Sträva efter att använda lösningsmedel med liten miljöpåverkan.

Bilaga 2. Indata för LCA



Bilaga 3. Känslighetsanalys för affärsanalysen

Effekt av produktpris på totala intäkten

