

Deponiåtervinning

Skapa resurser genom att lösa ett miljöproblem, NSR, Helsingborg

Eric Rönnols, Samuel Svensson, Niclas Svensson, John L Esguerra



Med stöd från:



**STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM**

Förord

Nordvästra Skånes Renhållnings AB (NSR) har sedan 2013 ett samarbete med Linköpings Universitet beträffande deponiåtervinning (eng: landfill mining).

Inom ramen för samarbetet har bland annat ett pilotprojekt och flera examensarbeten genomförts 2016–2017. Under 2018–2020 har pilotprojektet följts upp genom ett större landfill mining projekt, där erfarenheterna från tidigare arbete utnyttjats med målet att utveckla ett optimalt arbetssätt för urgrävning och hantering av massor från biocellreaktorerna inom NSR:s återvinningsanläggning i Helsingborg.

Projektet har genomförts av med deltagande från NSR, Linköpings Universitet och Rönnols Miljökonsult. Som projektledare för olika delatapper har Eric Rönnols, Rönnols Miljökonsult, Samuel Svensson, NSR och Niclas Svensson, LiU fungerat.

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Deponiåtervinning – skapa resurser genom att lösa ett miljöproblem, NSR, Helsingborg	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Landfill mining – create resources and solving an environmental problem, NSR, Helsingborg	
Universitet/högskola/företag Nordvästra Skånes Renhållnings AB, Linköpings Universitet, Rönnols Miljökonsult AB	Avdelning/institution Institutionen för Industriell Miljöteknik
Adress 251 89 Helsingborg	
Namn på projektledare Eric Rönnols	
Namn på ev övriga projektdeltagare Samuel Svensson, Lars Dahlgren och Mattias Axelsson, NSR, Joakim Krook, Niclas Svensson och John L Esguerra, LiU	
Nyckelord: 5-7 st Landfill mining, deponiåtervinning, biocellreaktor, återvinning, resursanvändning	

Projektet har genomförts i ett nära och väl fungerande med driftpersonal på NSR:s anläggning i Helsingborg. Enhetschef/miljöingenjör Samuel Svensson har tillsammans med driftledare Lars Dahlgren och maskinförare Mattias Axelsson styrt och samordnat användningen av lämplig maskinutrustning för grävning, siktning och torkning av materialet. För den fysiska hanteringen av avfallet (bl a urgrävning, siktning och vägning) har i första hand personal från Dalshult Skog och Entreprenad AB medverkat. Maskinutrustning har dels hyrts in från Dalshult (skaksikt, grävare) och Norditek (skak- och vindsiktar) dels har NSR:s egen utrustning nyttjats (trumsiktar, hjullastare m m). Provtagning på avfall och vatten har utförts av NSR:s personal genom bland annat vatteningenjörerna Ahmed Alsale och Talal Mahmood. Plockanalyser har dels utförts internt av NSR, dels av Envir AB. Kemiska analyser, lakteter och analyser av bränslefraktionerna har utförts av Eurofins.

Åsa Strickland och Jenny Kivistö, Sweco Environment AB har planerat och genomfört emissionsmätningar kring urgrävningen, vilket gett ny kunskap och konkreta data

beträffande utsläpp till luft vid deponiåtervinning. Mätningarna kompletterar de emissionsundersökningar som genomfördes av Fluxsense under pilotprojektet.

John L Esguerra och Niclas Svensson, Linköpings Universitet, har ansvarat för modellberäkningarna beträffande förväntat ekonomiskt utbyte och klimateffekter av urgrävning av biocellreaktorn. Underlagsdata till modelleringen har tagits fram av NSR i det praktiska arbetet med urgrävning och behandling av avfallet.

Projektet har följts av en referensgrupp med representanter från Avfall Sverige, Stena Metall, Tekniska Verken i Linköping, Linköpings Universitet och NSR.

Projektet har inom ramen för programmet ”Strategiskt innovationsprogram RE:Source” samfinansierats av Energimyndigheten (35 %), Nordvästra Skånes Renhållnings AB (61%), Linköpings Universitet (4%) och Rönnols Miljökonsult AB (1%).

Slutrapporten har sammanställts av Eric Rönnols, projektledare, tillsammans med Samuel Svensson, NSR, Niclas Svensson och John L Esguerra, Linköpings Universitet.

Helsingborg 2021-01-29

Eric Rönnols Samuel Svensson Niclas Svensson John L Esguerra

Innehållsförteckning

Förord.....	2
Innehållsförteckning	4
Sammanfattning	5
Summary	6
Inledning och Bakgrund.....	7
Är avfallsdeponier ett problem eller en resurs?	7
Varför satsar NSR på landfill mining?.....	8
Tidigare och pågående forskning inom landfill mining.....	8
Projektets målsättning.....	10
Genomförande	11
Kategorisering av deponier	11
Karaktärisering av biocellreaktor 2001 (BCR01).....	11
Genomförda försök 2018 – 2020	13
Testperiod 1, hösten 2018	14
Testperiod 2, hösten 2019	15
Testperiod 3, våren 2020	16
Urgrävningar i BCR 01, omfattning	17
Provtagning och analyser	18
Resultat	19
Avfallskaraktärisering, urgrävt material före behandling.....	19
Utvärdering av olika tekniker för sortering av uppgrävt avfall	20
Bränslefraktion.....	22
Finfraktionens ("jordfraktion") användbarhet	24
Tung fraktion, efter vindsiktning	26
Stabilisering av finfraktion tillsammans med slaggrus?	29
Lokal miljöpåverkan av Landfill Mining?.....	30
Utsläpp till luft	30
Tidigare mätningar av metanavgång.....	30
Mätning av metanavgång 2018.....	31
Gasuttag	32
Lakvatten	32
Utvärdering av miljö och ekonomi	34
Utvärdering av klimatpåverkan	35
Landfill mining som kolsänka?.....	37
Utvärdering av ekonomi i landfill mining	38
Resultat i relation till aktuell forskning	40
Slutsatser, diskussion om nyttiggörande av resultaten	42
Projektkommunikation.....	44
Referenser, källor.....	44
Bilagor	45

Sammanfattning

Projektet ”Deponiåtervinning” har haft som mål att vidareutveckla erfarenheterna från pilotprojektet 2016/2017, testa kommersiellt tillämpliga tekniker för urgrävning och återvinning av material från deponier, karaktärisera utvunna fraktioner och genom modelleringar visa deponiåtervinningens nettoutfall, klimatmässig och ekonomiskt.

Projektet har genomförts i en skala som kan betraktas som jämför bara med hur deponiåtervinning/landfill mining skulle kunna bedrivas i kommersiell skala. Utgrävning och behandling av material har skett i tre etapper, med mellanliggande utvärderingar och beslut om justeringar i utnyttjade tekniker. Totalt har urgrävning och sortering omfattat över 7 000 m³ tidigare upplagt avfall i en biocellreaktor hos NSR i Helsingborg.

Olika processutformningar har testats och värderats utifrån prestanda och kostnader. En specifik teknisk lösning (trumsiktning i serie i kombination med vindsiktning och öppen torkning av den lätta fraktionen) har konstaterats ge bäst utfall både kapacitetsmässigt (ca 50 ton/h) och kostnadsmässigt (ca 160 kr/ton).

Omfattande karaktäriseringar av utvunna fraktioner har gjorts och jämförts med krav/riktlinjer på avfallsbränsle och konstruktionsmaterial för anläggningsändamål. Med den utvecklade tekniken konstateras att bl.a. ett bränsle med värmevärde > 4 MWh/ton och acceptabel ask-, fukt- och klorhalt kan tas fram, liksom konstruktionsmassor användbara för anläggningsändamål i första hand inom avfallsanläggningar.

Modelleringar av klimatpåverkan och ekonomi, utvecklad vid Linköpings Universitet, visar att deponiåtervinning med framtagna metoder och aktuella förutsättningar ger ett positivt nettoutfall beträffande både klimat och ekonomi, även utan att den samhällsekonomiska vinsten av minskade utsläpp värderas. Det dominerande ekonomiska värdet har visat sig vara tillskapandet av nya volymer inom en befintlig anläggning, varigenom det går att undvika att ny mark behöver tas i anspråk för avfallsdeponering.

För att skapa en ”kolsänka” genom deponiåtervinning krävs enligt beräkningar i projektet att den fossila plasten separeras ut från bränslefraktionen, vidarebehandlas genom t ex. tvättning och kan ersätta jungfrulig plastråvara i enklare tillämpningar (eller t.o.m. återdeponeras). Något som kan vidareutvecklas i kommande projekt.

Erfarenheterna från projektet bedöms kunna komma att användas fullskaligt inom NSR och även fungera som underlag för bedömning av om landfill mining är realistiskt, ekonomiskt och miljömässigt, i andra projekt både i Sverige och internationellt. Deponiåtervinning måste dock alltid värderas ”platsspecifikt”.

Vid miljöprövning för etablering av nya deponier skulle möjligheten till deponiåtervinning på befintliga deponier generellt kunna vara en åtgärd att värdera som ett alternativ till att ta ny mark i anspråk. Den klimatnytta som deponiåtervinning skapar värderas idag tyvärr inte på ett sådant sätt att den kommer verksamhetsutövaren till godo, vilket kanske måste ändras för att stimulera deponiåtervinning i större skala.

Summary

The project "Landfill Mining" had a goal to further develop the experiences from the 2016/2017 pilot project, test commercially viable technologies for recovering material from old landfills, characterizing recovered fractions and through modelling illustrate the environmental and economic outcome of landfill mining.

The tests have been carried out in a scale that can be compared with a commercial landfill mining project. Excavations and treatment of material have been done in three steps, with stepwise assessments and adjustments of the technologies used. In total more than 7 000 m³ of waste deposited in a biocell reactor at NSR in Helsingborg has been treated.

Different process technologies have been tested and evaluated with regard to capacity and costs. One specific solution (two drum sieves in series, combined with wind sifting and open drying of the light fraction) was considered to give the best output, both regarding capacity (around 50 tons/h) and costs (around 160 SEK/ton).

Extensive characterizations of recovered fractions have been done and compared with demands/guidelines regarding waste fuel and materials for construction purposes. With the chosen technology a waste fuel with a heating capacity > 4MWh/ton and acceptable content of ash, moisture and chlorine was produced. Also soil material (fine fraction) useable for constructions primarily at the waste management site was recovered.

Modelling of climate impact and economy, with a method developed at the University of Linköping, shows that landfill mining, with the established methods and preconditions, gives a positive net outcome regarding both climate impact as economy. The predominant economic value is recovery of void space within the waste management site, which also means that the need of virgin land for depositing of waste is reduced.

To create a carbon sink through landfill mining it is shown in the modelling that the fossil plastic has to be separated from the waste fuel and further treated (washed) to an extent that the recovered plastic can be used as raw material in the plastic industry, thereby reducing the need of virgin plastic. Even re-depositing of such an inert and fossil fraction could create a carbon sink. This idea could be further developed in future projects.

The experiences from this project will be useful in full scale at NSR and can also serve as a ground for considering if landfill mining is a realistic option, economically and environmentally in other projects, both in Sweden and internationally. A landfill mining project must always be evaluated for the specific site.

When permits/applications for new landfill sites are discussed it could generally be an idea to consider landfill mining of an existing landfill as one alternative. The positive climate impact created by landfill mining is today not fully valued, which perhaps must be changed to stimulate landfill mining at a larger scale.

Inledning och Bakgrund

Är avfallsdeponier ett problem eller en resurs?

Deponier har en negativ miljöpåverkan på flera sätt. Processerna när organiskt avfall bryts ned anaerobt orsakar en långvarig emission av klimatpåverkande gaser (i huvudsak metan). Lokal påverkan orsakas ofta av utsläpp av föroreningar till yt- och grundvatten som i sin tur kan påverka mark och växtlighet och utgöra hälsorisker för djur och människor. Samtidigt kan deponierna ses som ”resurslager” av material som vid tiden för uppläggningsen saknade marknadsekonomiskt värde.

Genom att dels värdet på råvaror och mark förändras, dels att den klimat- och miljöpåverkan deponeringen orsakar bör betraktas som en samhällsekonomisk kostnad kan det idag i många fall vara befogat att beräkna om deponiåtervinning är ekonomiskt och miljömässigt motiverad. I föreliggande projekt har genom praktiska försök och beräkningar byggda på fältförsöken en modell tagits fram för beräkning av ett deponiåtervinningsprojekts klimatomässiga och samhällsekonomiska relevans.

Deponering av hushållsavfall uppgick under 1990-talet till mer än 1 000 000 ton/år. Genom ändrad lagstiftning, införande av avfallsskatt (2000), ökad satsning på material- och energiåtervinning och deponiförbud för organiskt avfall (2005/08) har deponering av hushållsavfall idag i det närmaste upphört, under 2019 deponerades endast ca 37 000 ton hushållsavfall (NV, 2020¹).

Däremot finns miljontals ton deponerat kommunalt avfall kvar i upplag/deponier med varierande kvalitet beträffande skydd för människor och miljön.

Större deponier var av historiska skäl ofta lokaliserade i närheten av de tätorter de betjänade. Idag har många tätorter vuxit ytmässigt så att deponierna skapar problem för fortsatt utbyggnad av bostads- och verksamhetsområden. Gamla deponier utgör därför i många fall planeringhinder. I andra fall kan deponierna innebära risker för störningar i känsliga natur- och vattenmiljöer.

Tidigare deponerat avfall innehåller även material som idag skulle kunna utgöra råvaror för ny produktion, bränsle för energiåtervinning eller konstruktions-material. Flera motiv finns således för deponiåtervinning. Samtidigt pågår sluttäckning av gamla deponier, något som minskar risken för störningar från deponierna, men samtidigt konserverar och bevarar deponimassorna som ett framtida potentiellt miljöproblem. Fram till 2030 bedömer Avfall Sverige² att befintliga deponier i princip kommer att vara sluttäckta. Från ekonomisk synpunkt bör kanske urgrävning värderas som alternativ till sluttäckning? Att däremot först sluttäcka och därefter gräva ur innebär ett dåligt utnyttjande av den investering på 250 – >300 kr/m², som en sluttäckning normalt innebär.

Den praktiska kunskapen för hur urgrävning och resursutvinning kan ske ur tidigare deponerat, kommunalt avfall behöver förbättras. Under 2016/2017 genomförde NSR och Linköpings Universitet ett pilotprojekt beträffande urgrävning inom Filborna

¹ Svensk Avfallshantering 2019, Avfall Sverige, 2020

² Svensk Avfallshantering 2019, Avfall Sverige, 2020

återvinningsanläggning i Helsingborg med stöd av RE:Source³. Projektet gav underlag för planering av en större urgrävning för att ta fram bättre kunskaper om kostnader, värden och miljöproblem kring urgrävningar och behandling av uppgrävt kommunalt avfall i en mer kommersiell skala.

Med ökad kunskap om klimat- och miljömässiga och samhällsekonomiska effekter av deponiåtervinning kan det kanske snart vara relevant att inför etablering av nya deponier alltid kräva att ”återvinning” av en befintlig deponi tas med som ett alternativ till att ny mark tas i anspråk?

Varför satsar NSR på landfill mining?

Filborna avfallsupplag upptar idag en stor del av Helsingborgs återvinnings-anläggning och är en av Sveriges största avfallsdeponier, med en area på över 35 ha och totalt över 10 miljoner m³ deponerat avfall. Deponin har använts under mer än 50 år. Avfallet är delvis nedbrytbart och kommer under lång tid fortsätta generera metan och lakvatten som kräver omhändertagande.

Deponin ligger inom ett expansivt industriområde med stigande markvärden där ett mer effektivt utnyttjande av marken är högst önskvärt. NSR har därför ett behov av utveckling av metoder för att i större skala kunna gräva ut och återvinna deponerat avfall och skapa utrymme för andra verksamheter inom området.

Läckage av metan från deponier utgör en av NSR:s viktiga miljöaspekter, vilket gör att åtgärder för minimering av utsläppen är en prioriterad miljöåtgärd. Läckaget kan minska genom flera typer av åtgärder som uppsamling och förbränning av deponigas, sluttäckning och även urgrävning/landfill mining.

Vid Filborna finns således mycket konkreta motiv till deponiåtervinning för att dels utnyttja gjorda investeringar i bottenfästningar och lakvattenuppsamlings-system effektivare, dels slippa ta ny mark i anspråk för deponering och samtidigt skapa en resurs för ett förväntat större behov av deponering av förorenade massor i framtiden.

NSR har även tidigare erfarenhet från flera projekt med syftet att återvinna mark, minska deponistorlek och sluttäkningsbehov och återvinna konstruktionsmassor.

Tidigare och pågående forskning inom landfill mining

Sedan pilotprojektet genomfördes har det hänt en del inom forskningen kring landfill mining. Främst har detta skett inom ramen för ett större forskningsprogram som har finansierats av EU, New-Mine. I det programmet har 15 olika doktorander arbetat med projekt som har olika koppling till landfill mining. Till skillnad från mycket av den tidigare forskningen, som har fokuserat på konventionell teknik (cf. Krook et al, 2012), så har New-Mine fokuserat på avancerad teknik med målet att valorisera så mycket av materialet efter separeringen som möjligt (cf Hernandez Parrodi et al, 2019). Det senare har benämnts Enhanced Landfill Mining (Jones et al, 2013).

³ Deponiåtervinning, Pilotprojekt – urgrävning av biocellreaktorer, NSR, Helsingborg, RE:Source projektnr 42529-1, 2017

Under de senaste åren har även två litteraturstudier över ekonomiska analyser av landfill mining genomförts (Esguerra et al, 2019, Krook et al, 2020). Den ena studien har även kritiskt studerat analyser av miljöpåverkan av landfill mining (Krook et al, 2020). I den första studien lyfts att det generellt har varit svårt att få positiva ekonomiska utfall i de olika studerade fallen av landfill mining då kostnaden för uppgrävning, separering och gate fees varit högre än intäkterna från bland annat försäljning av material (Esguerra et al, 2019).

Dessutom konstateras att flera av de granskade fallen hade haft svårt att få tag i data från sina specifika fall och i hög grad hade använt generella data för både materialflöden och de ekonomiska posterna. Hur dessa antaganden påverkar osäkerheten och variabiliteten studeras sällan i någon större detalj vilket gör att det blir svårt att dra generella slutsatser om vad som påverkar och i vilken grad som det påverkar det ekonomiska utfallet (ibid). Dessutom är de studerade fallen ofta antingen hypotetiska eller uppskalningar från småskaliga pilotstudier.

Analyser av större landfill mining-fall är fortfarande sällsynta (ibid). När det gäller miljösystemanalytiska studier av landfill mining så har inte så mycket publicerats sedan pilotstudien genomfördes. Liknande problem med förenklingar och generella data som i de ekonomiska analyserna kan konstateras även för studier av miljöpåverkan (Krook et al, 2019). Bägge litteraturstudierna lyfter fram behovet att ha ett större lärandefokus snarare än som i tidigare studier fokusera på beslutsstudier där frågan om landfill mining är bra eller inte försöker besvaras. Det senare fokuset har gjort det svårt att föra över kunskap till kommande studier då studierna svarar på hur det ser ut i specifika fall snarare än att kunna generalisera kunskaper om landfill mining (ibid).

Laner et al (2019) är ett av undantagen där det ekonomiska utfallet av landfill mining studeras utifrån ett lärandeperspektiv. I denna studie konstateras att kostnader för avfallshantering och deponering av utsorterat avfall samt undvikna kostnader från deponihantering som behövts om landfill mining inte utförts är de poster som påverkar det totala ekonomiska utfallet mest (ibid).

Utöver studier kring landfill minings ekonomiska potential och miljöpåverkan så har även ett par artiklar kring materialkaraktistik publicerats. Det har tidigare konstaterats att finfraktionen ofta ställer till problem då innehållet av främst metaller gjort det svårt att klara gränsvärden för att klassas som konstruktionsmaterial (Johansson et al, 2017). Resultaten i en studie av Vollprecht et al (2020) visar att finfraktionen från ett Österrikiskt landfill mining-projekt innehåller för höga totalhalter av flera metaller samt att lakbarheten för nickel är för hög för att fraktionen skall klara landets gränsvärden för användbarhet.

Projektets målsättning

Projektet är en fortsättning av pilotprojektet som genomfördes 2016/17 och har som målsättning att vidareutveckla dessa resultat och erfarenheter i en större skala.

Projektets mål är i huvudsak kvalitativa:

- **Att utveckla kommersiellt tillämpbar behandlingsteknik för ”landfill mining”:**
 - Testning av olika typer av processutrustning, vilka steg bör ingå för bästa resultat med aktuellt avfall?
 - Vad är en rimlig prestanda beträffande urgrävning och behandling, uttryckt i ton/h etc.
 - Vilka är de direkta kostnaderna och intäkterna i det aktuella landfill mining projektet?
- **Karaktärisera olika fraktioner (jordmassor, bränsle, andra fraktioner) från urgrävt avfall:**
 - Bedöma materialets användbarhet genom jämförelse med aktuella kvalitetskrav på bränsle, konstruktionsmaterial, återvinningsmaterial (t ex plast).
 - Mål för jordfraktion:
 - Jorden ska vara fri från synliga plastpartiklar,
 - Den organiska halten bör vara lägre än 10 % TOC,
 - Totalhalterna och lakningsegenskaperna bör uppfylla NV:s krav för användning som konstruktionsmassor inom avfallsanläggningar och om möjligt även för fri användning (efter platsspecifik bedömning),
 - Mål för bränslefraktion (leveranstillstånd)
 - Värmevärde, >2 MWh/ton, helst över 4 MWh/ton
 - Askhalt, <25 %,
 - Fukthalt max 50 %, men helst betydligt lägre
 - Klorhalt, <1 %
 - Fritt från överstort material, sten, betong, grus och metall
- **Att genom livscykelanalys (utvecklad i tidigare forskningsprojekt) visa deponiåtervinningens nettoutfall beträffande**
 - Miljöpåverkan, resursutnyttjande och samhällsekonomiska effekter.
- **Att visa deponiåtervinningens potential beträffande möjligheten att skapa kolsänkor:**
 - Ta bort fossilt material ur kretsloppet (ton CO₂-ekvivalenter till atmosfären som undviks per ton avfall som återvinns/tas ur kretsloppet).

Resultaten av projektet ska dels kunna tillämpas praktiskt i kommande landfill mining projekt, dels kunna utnyttjas som ”metodbeskrivning” och kunskapsunderlag inför beslut om åtgärder beträffande alternativa åtgärder till inkapsling för deponier som idag utgör både planeringshinder och miljö- och hälsorisker.

Effekten av att ny kunskap tas fram inom projektet förväntas vara ökade möjligheter att få gehör för en bättre resurshushållning, där även hanteringen av deponerat avfall kan värderas samhällsekonomiskt, bland annat med hänsyn till klimat- och miljöeffekter.

Genomförande

Det aktuella projektet avser utgrävning i en biocellreaktor, en typ av deponi/behandling för avfall med hög andel organiskt material och optimerad för energiuttag via deponigasbildning. Ett antal liknande deponier finns i Sverige men i större utsträckning i länder där avfallet har en större andel organiskt innehåll. Tidigare har deponiåtervinning från denna typ av avfallsupplag inte uppmärksamrats inom forskningen.

Kategorisering av deponier

Avfallssammansättning i deponier varierar beroende på flera faktorer:

- Från vilken tidsepok härstammar deponerat avfall?
- Vilka var avfallslämnare? Har det funnits industrier med specifika avfallsslag i upptagningsområdet?
- Hur har fördelningen mellan hushålls- och verksamhetsavfall varit?
- Vilken service har funnits beträffande återvinning?
- Har avfallet förbehandlats före deponering?

För deponiåtervinning har därför erfarenheter från studier på andra deponier ett begränsat värde när det gäller att bedöma det ekonomiska värdet i återvunnet material. Även värdet av återvunnen mark är mycket platsspecifikt.

Däremot är erfarenheter från andra projekt värdefulla beträffande tekniska lösningar, modellering av data, värdering av miljö- och klimatvinster med mera.

Karaktärisering av biocellreaktor 2001 (BCR01)⁴

BCR01 byggdes under 2001 som en del av NSR:s satsning på biologisk behandling av restavfall från hushåll och industri. Reaktorn anlades på en uppbyggd botten av lera, med en täthet och funktion som motsvarar kraven på bottentätning och geologisk barriär under en deponi. I miljöprovning av anläggningen 2007 har cellerna godkänts som underlag för framtida deponering av icke farligt avfall genom att miljödomstolen medgav avsteg från kravet på geologisk barriär i anslutningen mot tidigare deponidelar.



Figur 1. Lerbotten till BCR01 under uppbyggnad (2001)

⁴ Från Deponiåtervinning, Pilotprojekt – utgrävning av biocellreaktorer, NSR, Helsingborg, RE:Source projektnr 42529-1, 2017

BCR01 fylldes under perioden mars 2001 - oktober 2002 med 136 000 ton förbehandlat avfall (79 000 ton restavfall från hushåll och 57 000 ton industriavfall). Genom sönderdelning, optimering av fukthalt och inkapsling skapades förutsättningar för en snabb, anaerob nedbrytning och gasproduktion.



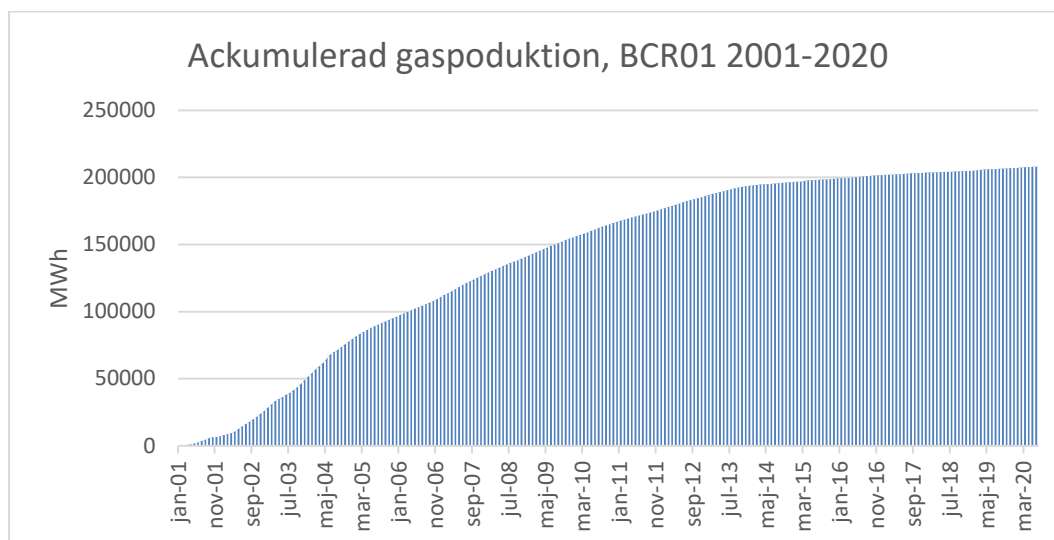
Figur 2. BCR01 efter inläggning av avfall och inkapsling med tätduk (oktober 2002)

Målsättningen vid projektets start var att kunna ta ut ca 160 Nm³ biogas/ton behandlat avfall, motsvarande ca 85 000 MWh, vilket bedömdes vara den från praktisk/teknisk synpunkt utvinnbara mängden biogas från aktuellt avfall under en rimlig behandlingstid (3-7 år). Reaktorn skulle därefter tömmas och utnyttjas för behandling av nytt avfall. Den förväntade ”massbalansen” för BCR-driften framgår av Tabell 1 (Meijer, Björnsson, 2005).

Tabell 1. Bedömd massbalans för BCR01, förväntad fördelning i vikt-% av inkommande mängd avfall efter nedbrytningsprocessen.

Material/produkt	In (%)	Ut (%)	Kommentar
Inkommande till BCR	100		Restavfall efter mekanisk sortering och sönderdelning
Biogas		20	Till värme-, el- eller fordonsbränsle
Koldioxid, vatten		10	Från efterkompostering, stabilisering, torkning
”Ymp” till ny BCR		3	Bakteriekultur för snabb uppstart ny reaktor
Material/bränsle		30-40	I huvudsak avfallsbränsle
Jordprodukter		20	Konstruktions/täckmaterial
Deponirest		10-20	Till intern deponi

Uttag av deponigas har därefter skett kontinuerligt. Av diagrammet nedan, Figur 3, framgår att den förväntade energimängden (ca 85 000 MWh) utvunnits redan efter ca 4 år och att gasproduktionen därefter fortsatt i avklingande takt i ytterligare 15 år. Uppföljningen visar att i storleksordningen 300 Nm³ biogas kunnat utvinnas per ton behandlat avfall i biocellreaktorn, vilket beräkningsmässigt motsvarar en ungefärlig reduktion av organiskt material med 200 – 250 kg per ton inlagt avfall. Det höga, sammantagna gasuttaget är en indikation på att avfallet stabiliserats väl och att risken för störningar i form av lukt och gasemissioner i samband med en utgrävning bör vara relativt liten. Gasuttaget har idag klingat av till ca 26 Nm³/h (medel under 2019-2020).



Figur 3. Ackumulerad gasproduktion för BCR01, 2001 - 2020

Genomförda försök 2018 – 2020

Försöken med urgrävning och behandling av urgrävt material har skett i tre olika etapper, med syfte att testa olika uppställningar av siktutrustning. Se nedan och även Bilaga 3.



Figur 4. Översikt, områden för urgrävning inom BCR01, 2018-2020

Inom en del av BCR01 iordningställdes en arbetsyta för hantering av uppgrävda massor (siktning, torkning, uttag av prover m.m.), se Figur 4 och Figur 5.



Figur 5. En arbetsyta iordningställdes inom en del av BCR01 för att minimera transporterna

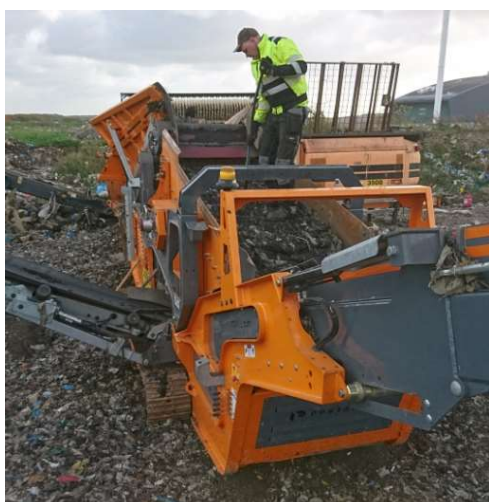
Testperiod 1, hösten 2018

I den första etappen (AP1), oktober 2018, utgjordes utrustningen av två trumsiktare och en konventionell skaksikt, avsedd i första hand för bergkross/oorganiska jordar, se Figur 6 och Figur 7. Skaksikten, modell Portafill 5000 CT, var utrustad med två enkla såll, 40 respektive 20 mm. I trumsiktarna, Doppstadt 620 och 518 i serie, testades olika uppsättningar såll:

- 40 och 20 mm
- 80 och 40 mm
- 100 och 20 mm



Figur 6. Två trumsiktare i serie



Figur 7 Skaksikt modell Portafill 5000 CT



Figur 8. Enkelt såll, 40 mm, i skaksikt

Siktningen resulterade i båda fallen tre storleksfraktioner som provtogs och analyserades var för sig.

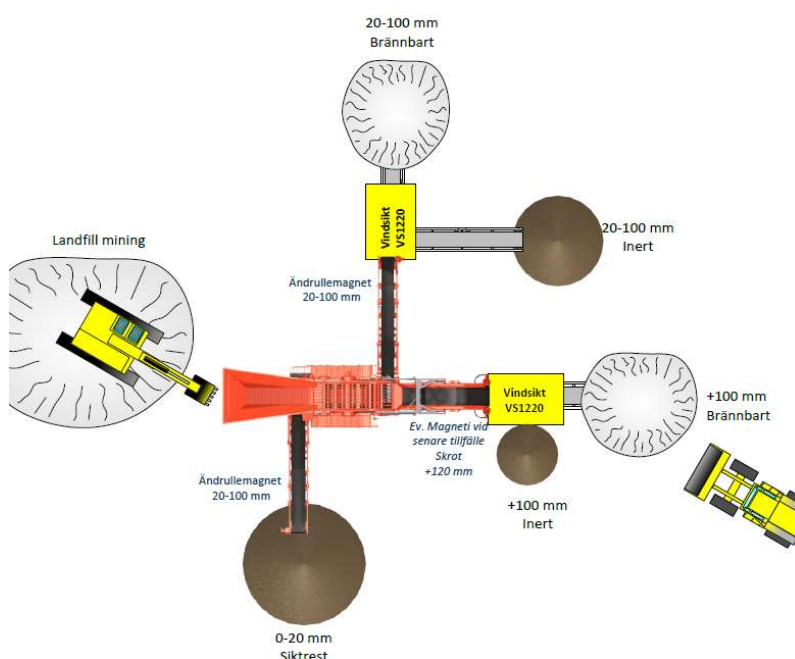
I försöken bedömdes även driftsäkerhet och kapacitet för de olika teknikerna.

Testperiod 2, hösten 2019

Under testperiod 2, hösten 2019, kombinerades skaksiktning med vindsiktning för de grövre fraktionerna, med syftet att förbättra kvaliteten hos framförallt de större fraktionerna (30–100 mm och >100 mm) genom att eliminera tyngre material som betong, sten och liknande från den lättare fraktionen (avsedd som bränsle), se Figur 9 och Figur 10.

Den uppställning som testades var:

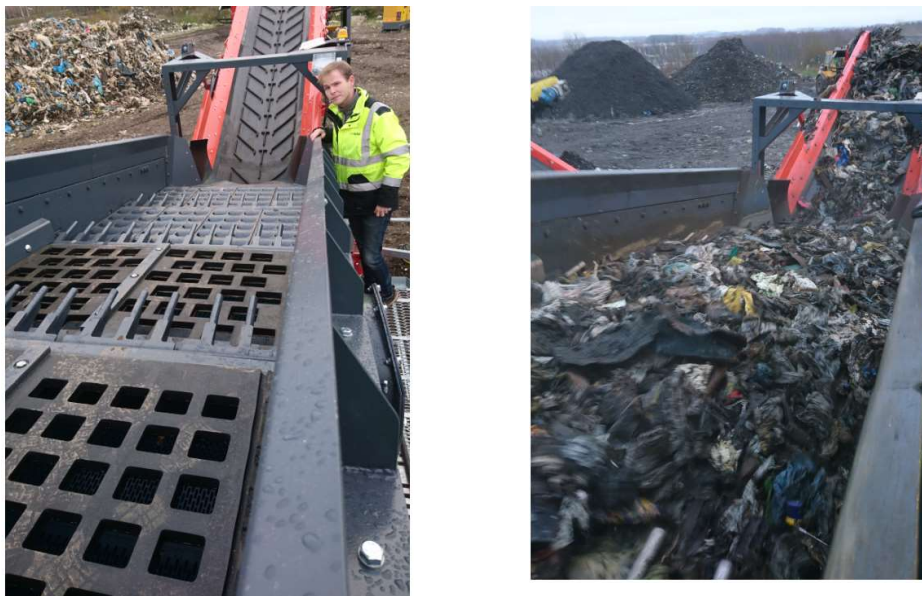
- En avancerad skaksikt (Spalec) med ”flip-flop”-teknik i sållet för att undvika igensättning.
- Vindsiktar, Norditek VS 2120, på de grövre fraktionerna, >100 mm och 30–100 mm.
- På banden för fraktionerna <30 mm respektive 30–100 mm monterades ändrulle-magneter för avskiljning av magnetisk metall.



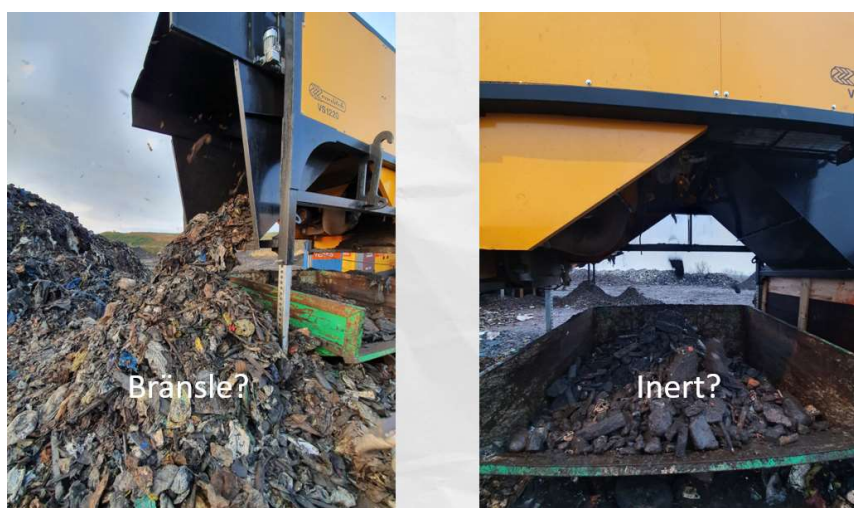
Figur 9. Flödesschema, uppställning av siktutrustning under testperiod 2, hösten 2019



Figur 10. Uppställning, skaksikt (Spalec) och vindsiktar (Norditec) för försök under testperiod 2



Figur 11. "Flip-flop"- screen, Spalec skaksikt. Vid överbelastning riskerar material att "flyta med" osiktat



Figur 12. Fraktionerna > 100 mm efter skak- och vindsiktning (lätt respektive tung fraktion)

Testperiod 3, våren 2020

Efter en preliminär utvärdering av resultaten från de första körningarna bestämdes att en tredje testkörning borde göras med en ny uppställning där erfarenheterna från tidigare försök utnyttjades för att maximera det möjliga utfallet från kvalitets- och kapacitets-synpunkt, Figur 13.

Den uppställning som testades var:

- Trumsiktare i serie, med såll 80 mm och 20 mm
- Vindsiktning av fraktionerna >80 mm och 20–80 mm
- Torkning i strängar av bränslefraktionen (> 80 mm)

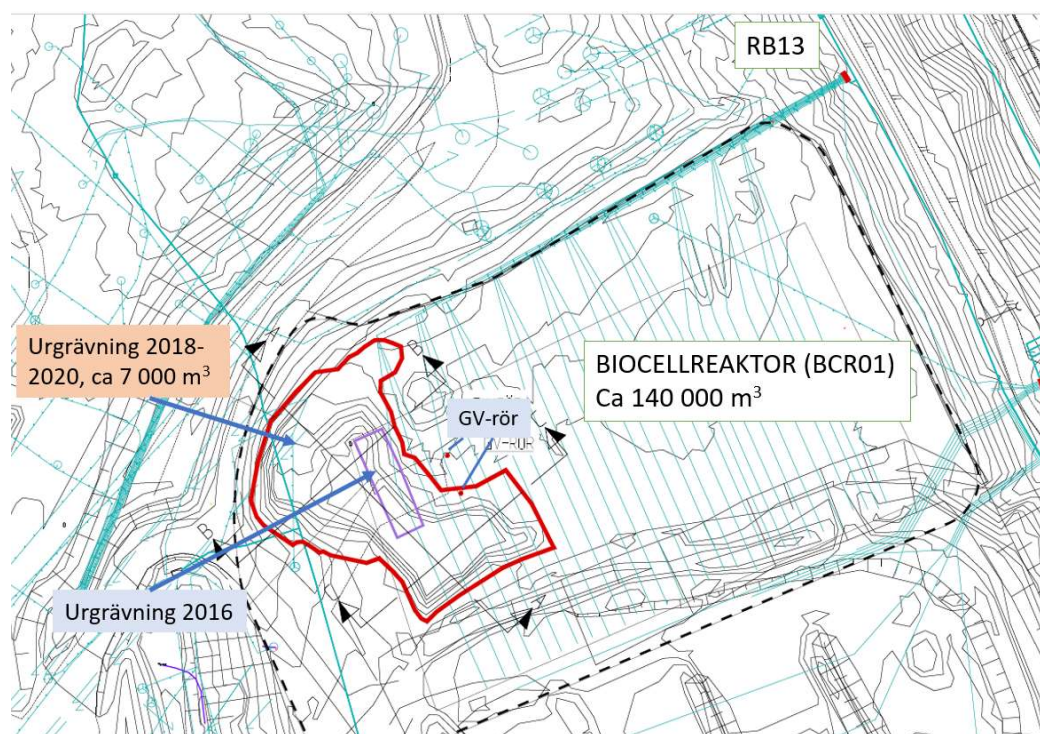


Figur 13. Uppställning, trumsiktar och vindsiktar, våren 2020

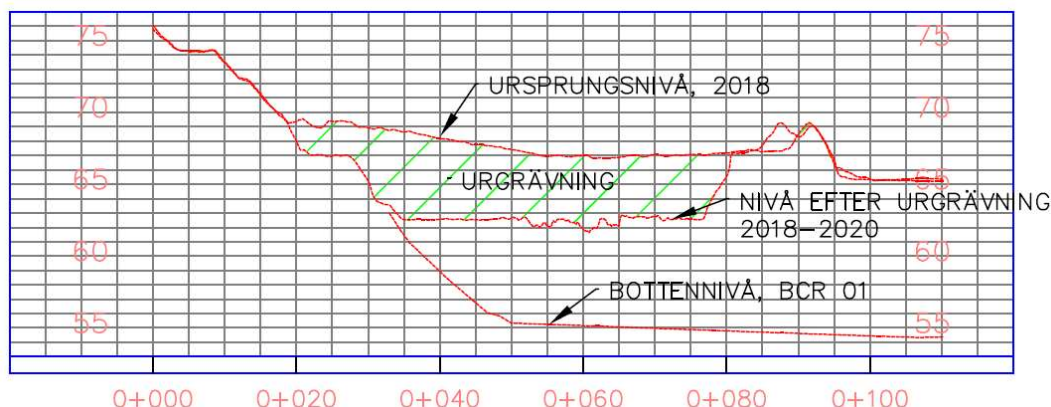
Urgrävningar i BCR 01, omfattning

Under de tre testperioderna har urgrävningarna sammantaget omfattat drygt 7 000 m³ massor från BCR 01, motsvarande ca 5 % av cellens hela volym. Se Figur 14 och Figur 15.

Urgrävningarna har begränsats till den volym som bedömts tillräcklig för att testa tillämpning av de tre olika behandlingsteknikerna i fullskaleförsök.



Figur 14. Sammantagen omfattning av urgrävningar under de tre testperioderna 2018 – 2020



Figur 15. Sektion A – A genom urgrävning i BCR 01. Sektionens läge se översikt i **Figur 14**

Provtagning och analyser

Finfraktionerna analyserades beträffande totalhalter och lakbarhet (metaller, PAH, salter) för bedömning av fraktionen användbarhet som konstruktionsmaterial.

De grövre fraktionerna analyserades beträffande bränsleegenskaper (bl. a. värmevärde, fukthalt, askhalt, klorinnehåll) för en bedömning av fraktionens användbarhet som bränsle.

Plockanalyser utfördes på de tunga fraktionerna efter vindsiktning, för en bedömning av om materialet skulle kunna klassas som "oorganiskt" och därmed kunna vara acceptabelt för användning till exempel i terrasseringskiktet i sluttäckningsarbeten.

Även på icke sorterat material har plockanalyser genomförts, som underlag för bedömning av den totala fördelningen av materialtyper i avfallet som behandlats i försöken. Resultaten ger även en bild av hur ca 18 års nedbrytningen påverkat inlagt material i BCR 01 fysiskt.



Figur 16. Uttag av representativa prover för bränsleanalys

Resultat

Avfallskaraktärisering, urgrävt material före behandling

Avfallet som lades in i biocellreaktorerna karaktäriserades genom plockanalyser vid starten 2001/2002 (Meijer och Björnson, 2005). Under behandlingen i reaktorerna, som syftat till att utvinna biogas, har mängden och karaktären hos kvarvarande avfall förändrats, framförallt genom nedbrytningen av organiskt material och uppsamlingen av bildad biogas. Under perioden har avfallsmängden reducerats med i storleksordningen 25 % genom uttaget av biogas. Genom lakvattenavledning har ytterligare viktreduktion skett.

Prover på material i BCR01 har tidigare tagits ut och plock-analyserats, dels i ett examensarbete 2014 (Karlsson, Åslund, 2014), dels i pilotprojektet 2016/2017, dels i ett examensarbete 2017 (Svensson, 2017).

I pilotförsöket 2016/2017 och examensarbetet 2017 gjordes plockanalyserna på den grövre fraktionen av uppgrävt avfall (>40 mm). Efter plockanalysen torkades utsorterade fraktioner för att få materialfördelningen per kg TS. I examensarbetet 2017 ingick även ett försök med tvättning av olika fraktioner för en bedömning av andelen föroreningar (i huvudsak finmaterial/jord) i respektive fraktion.

Inom föreliggande projekt har tre delprover på obehandlat avfall från BCR01 tagits ut för plockanalys. Resultaten redovisas i Bilaga 5.

I Tabell 2 jämförs karaktäriseringen inlagt avfall 2001/2002 med plockanalyserna på urgrävt, osorterat avfall 2020, från BCR 01.

Tabell 2. Karaktärisering av avfallet från BCR01, dels vid inläggning (2001/2002), dels vid urgrävning 2020

Material	Avfallssammansättning i BCR01			
	2001/ 2002	2020		
	Våt vikt	Våt vikt	TS	Efter torkning 105°C
	Vikt-%	Vikt-%	Vikt-%	Vikt-%
Papper	22,7	10,3	34	5,7
Trä	11,1	13,6	40	9,0
Plast	15,7	29,9	65	31,5
Gummi		0,6	94	0,9
Textil	6,0	2,3	43	1,6
Trädgårdsavfall	-	2,9	-	1,9
Övrigt brännbart	-	8,3	61	8,2
Summa brännbart	55,5	67,9	53	58,8
Matavfall	25,9	0	-	0
Järn	4,6	2,6	92	4,0
Aluminium		0,7	72	0,8
Koppar		-	-	-
Elektronik	0,2	0,5	98	0,8
Farligt avfall	0,2	0,0		0,1
Inert avfall	7,3	11,6	96	17,8

Glas		1,4		2,3
Finfraktion < 15	6,3	15,3		15,4
TS, medel			61 %	

Analyserna av det osorterade avfallet 2020 visar bl a:

- Allt matavfall och en stor del av pappers- och textilfraktionerna har brutits ned, vilket indikerar en viktninskning av avfallet i samma storleksordning som den teoretiska beräkningen baserad på biogasuttaget (ca 25%).
- Pappersandelen i avfallet har halverats genom nedbrytning,
- Plastandelen är lätt att överskatta på grund av nedsmutsning av framförallt mjukplasten (jord, m.m.). Tvättningen visar att ca 30–40 % av plastfraktionen utgörs av föroreningar.
- Andelen metaller utgör ca 5 %, varav <1% är ”non ferrous”, dvs aluminium, koppar etc,
- Fin- och inertfraktion (jord, sten grus m.m.) utgör ca 25–30 % av avfallsmängden vid plockanalys på ursprungsmaterialet. Siktningen/ behandlingen ökar andelen avsevärt genom att jordpartiklar slås av från de olika materialfraktionerna, se vidare, avsnitt xx).
- Andelen ”brännbart” material, inklusive föroreningar på materialen och fukt, i det uppgrävda avfallet uppgår till > 60 %. Siktningen/behandlingen av avfallet minskar andelen genom att jordpartiklar slås av från de olika materialfraktionerna, se vidare nedan, Tabell 3).
- Fukthalten i uppgrävt material uppgår totalt till ca 40 %.

Envirs rapport från plockanalyserna finns i Bilaga 5

Utvärdering av olika tekniker för sortering av uppgrävt avfall

De tekniker för sortering av urgrävt avfall som testats i projektet bygger på erfarenheter från pilotprojektet 2016/2017 och kunskaper om inlagt avfalls ursprungsegenskaper. Eftersom inlagt avfall varit förbehandlat (sönderdelning/uppfuktning) för att maximera bildning av biogas har det varit rimligt att anta att en stor del av materialet är nedbrutet och finfördelat, samtidigt som andelen plast förväntas var relativt hög.

Metoder som testats i olika kombinationer är:

- Trumsiktning,
- Skaksiktning,
- Vindsiktning,
- Torkning av bränslefraktion i strängar,
- Stabilisering av finfraktioner med annat oorganiskt avfall.

Förutsättningar för tillämpligheten av en teknik är, förutom kvalitetsaspekterna på producerade fraktioner, att kapaciteten och kostnaderna per ton hanterat avfall är rimliga.

Erfarenheterna från testperioderna visar bland annat:

- **Skaksikt** har med aktuell typ av avfall en känslighet för överbelastning, vilket resulterar i att finmaterial ”flyter med”, över första sållet och belastar bränslefraktionen i stället för att hamna i jordfraktionen.
- **Skaksikt** slår inte rent material från föroreningar lika effektivt som trumsikt.
- **Vindsikt** behövs på de grövre fraktionerna för att avskilja tungt material från bränslefraktionen.
- **Ändrullemagneter** för avskiljning av metall fungerar dåligt vid hantering av blött avfall på grund av att jord/organiskt material som fastnar på bandet dras av tillsammans med magnetiska metaller. Sannolikt kan överbandmagneter ge en bättre renhet på en avskild fraktion magnetisk metall.
- **Kapacitets- och kvalitetsmässigt** visade försöken att två trumsikt i serie med vindsiktning av de grövre fraktionerna gav bäst resultat.
- **Kostnadsmässigt** var hanteringen med trum- och vindsikt effektivast, ca 160 kr/ton hanterat avfall. I fallet skak- och vindsikt var timkostnaden för utnyttjad utrustning högre än i fallet trum- och vindsikt, samtidigt som kapaciteten var lägre för att få önskad kvalitet på framförallt bränslefraktionerna. Underlaget för kostnadsberäkningarna finns i Bilaga 3.

I nedanstående tabell sammanfattas resultaten av de tre uppställningarna översiktligt beträffande materialfördelning i olika fraktioner, kapacitet och hanteringskostnader.

Tabell 3. Sammanfattande resultat, tre olika uppställningar för siktning av uppgrävt avfall

		Två trum- sikt *)		Skaksikt + vindsikt **)	Två trumsikt + vindsikt ***)
Stor	Lätt	32%		43%	29%
	Tung			8%	9%
Mellan	Lätt	38%		13%	12%
	Tung			12%	15%
Fin		30%		20%	35%
Metall				3%	
”Bränsle”		51%		57%	42%
Jord, Tung + ”metall”		49%		44%	58%
Siktningshastighet		30-35 ton/h		45 ton/h	50 ton/h
Behandlingskostnad		110 kr/ton		170 kr/ton	160 kr/ton

*) Doppstadt trumsikt 518 och 620 med varierande såll (20 – 100 mm)

**) Norditek skakskik, Spalec och vindsikt VS 1220

***) Doppstadt trumsikt 518 och 620 och vindsikt VS 1220

Resultaten från siktförsöken, se Tabell 3, visar att den större, vindsiktade fraktionen utgör en dominerande del av bränslet.

För att minimera de sammanlagda kostnaderna för hanteringen av urgrävt avfall, inbegripet kostnader för slutligt omhändertagande av fraktionerna, visar utvärderingarna att det är viktigt att minimera bränslefraktionen och ”mellan-fraktionerna”. Även med ett högt värmevärde och i övrigt bra kvalitet innebär avsättningen av bränslefraktionen en avsevärd kostnad, i dagsläget ca 595 kr/ton.

Mellanfraktionen behöver delas upp i en lätt och en tung fraktion för att möjliggöra en rimlig avsättning. Den lätta, vindsiktade fraktionen kan gå som bränsle medan den tunga fraktionen måste ha en sådan sammansättning att den kan utnyttjas som konstruktionsmaterial under tätskiktet på deponin, vilket innebär att andelen organiskt material bör vara låg, under 10 %.

De olika fraktionernas sammansättning redovisas närmare i nedanstående avsnitt.

Bränslefraktion

Bränsleanalyserna visar att värmevärdet hos uppgrävt osiktat avfall är lågt men att behandling med skak- eller trumsikt, kombinerat med vindsiktning, ger ett bränsle som kan uppfylla de krav som ställs från branschen. Försöken visar även att en enkel torkning av bränslefraktionerna genom strängläggning och vändning kan reducera fukthalten väsentligt. Samtidigt är askhalten hög i bränslefraktionen, både före och efter torkning, vilket visar att en relativt stor mängd oorganiskt material häftar vid den organiska, brännbara delen av avfallet. Analyserna indikerar att trumsiktningen avlägsnar något mer föroreningar från bränslet än skaksikten. Ett sätt att minska askhalten, höja bränslevärdet och minska totalmängden bränsle kan vara vattentvättning av dessa fraktioner eller ytterligare trumsiktning (20 mm) efter en enkel torkning i strängar. Samtliga bränsleanalyser finns sammanställda i Bilaga 14.

I tidigare undersökningar (Svensson, 2017) har visats att utsorterade material-fraktioner kan utgöras av 10 - 35% finmaterial som kan tvättas bort, se Tabell 4. Beträffande plastfraktionen, som utgör ca 30–40 vikt-% av utsorterat bränsle enligt försöken 2017 var endast ca två tredjedelar verklig plast och resten utgjordes av smuts på plasten. En kompletterande analys på plockanalyserad plast 2020 visar en liknande andel föroreningar, Tabell 5 (Envir, 2021)

Tabell 4. Resultat av försök med tvätt av utsorterade fraktioner från uppgrävt avfall i BCR01 (från Svensson, 2017)

Fraktion	Viktförändring efter tvätt av fraktionen (%)	Kommentar
Plast	32	Jfr resultat från uppföljande analys av plastfraktion 2020 (ca 37 % jord/smuts), se Tabell 5.
<i>Ej magnetisk metall</i>	34	I huvudsak aluminiumförpackningar, devis fyllda med smuts vilket ger en stor påverkan på resultatet.
Magnetisk metall	12	Fraktionen utgör någon enstaka % av bränslemängden
Trä	16	
Gummi	3	
Farligt Avfall	18	I huvudsak ”tjärpapp”.

Textil	20	
Papper	Ca 18	Ej tvättad. Tvätt av papper leder till att materialet blir en smutsig pappersmassa. Uppskattningsvis är andelen finfraktion mycket lik den för farligt avfall ca 18%.
Övrigt brännbart	Ca 20	Ej tvättad. Fraktionen består av "sopor" huvudsakligen papper och textil, tex blöjor och bindor vilket förhindrar tvätt då pappersdelarna är problematiskt att tvätta. Uppskattningsvis är andelen finfraktion lik den för textil, ca 20%.
Inert	0	Ej tvättad. Tung-fraktion av sten, glas, tegel. Andel "smuts" bedöms mycket låg < 1%.
Elektronik	0	Ej tvättad. En glödlampa, batterier, datordelar, kablar. Uppskattningsvis <1% andel finfraktion.

Tabell 5. Resultat av torkning och tvättning av plastfraktionen i osorterat, uppgrävt avfall från BCR 01 (Envir, 2021)

Utsorterad "plastfraktion"		Prov 1	Prov 2	Prov 3	Medelvärde andel av våtvikt	Medelvärde, andel av TS
Plast	%	37	45	47	43	63
Fukt	%	35	27	32	31	-
Jord, smuts	%	28	28	21	26	37

Tvättning och öppen torkning av bränslefraktionen bedöms kunna reducera både själva bränslemängderna och askhalterna i bränslet väsentligt eftersom flera av de smutsigaste fraktionerna (plast, papper, trä, textil, övrigt avfall) tillsammans även dominerar bränslefraktionen viktmässigt. En viktninskning med 20 % skulle motsvara ca 100 kr/ton i minskad förbränningskostnad.

Försöken med vindsiktning har resulterat i två lätta fraktioner (bränsle), vindsiktade från mellanfraktion och den större fraktionen. Resultaten visar att vindsiktningen har stor betydelse för bränslekvaliteten.

Trumsiktning i två steg plus vindsiktning och torkning i strängar gav bäst resultat beträffande bränslekvalitet (högst värmevärde och lägre askhalt än efter skaksiktningen).

Tabell 6. Bränsleanalyser (Eurofins) på uppgrävt osorterat material och mellan- /stor fraktion av siktat material.

Parameter	Riktvärde KVV Filborna	Medelv. Två samlingsprov, år 2019	Mellan-fraktion (lätt)			Stor-fraktion (lätt)		
			Skaksikt + Vindsikt	Trumsikt + Vindsikt (före torkning)	Trumsikt + Vindsikt (efter torkning)	Skaksikt + Vindsikt	Trumsikt x 2 + Vindsikt (före torkning)	Trumsikt x 2 + Vindsikt (efter torkning)
Storleksfraktion		osorterat	30-100 mm	20-80 mm	20-80 mm	>100 mm	>80 mm	>80 mm
Fukthalt, %	<50	32	47	28	13	44	21	10
Svavel S: % av TS		0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4
Svavel S, % lev.tillstånd		0.3	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	0.4
Eff värmevärde torrt prov, (MWh/t)		2.6	2.4	2.3	3.4	4.0	4.2	4.8
Eff värmevärde lev tillstånd, (MWh/t)	>2	1.8	1.3	1.9	3.1	2.2	3.8	4.4
Askhalt inkl. askbildare % av TS		53	63	57	45	47	30	41
Askhalt inkl. askbildare % lev.tillstånd	10-30	36	34	41	39	27	24	37
Klor Cl % av TS	<1%	0.3	0.3	0.6	0.5	0.4	0.6	0.8
Klor Cl % lev.tillstånd		0.2	0.2	0.5	0.4	0.2	0.5	0.7

Grön markering = Kraven för mottagning till förbränning vid KVV Filborna, Öresundskraft uppfylls.

Sammantaget visar försöken att en acceptabel bränslefraktion kan tas fram med relativt enkel teknik och att det från ekonomisk synpunkt kan vara intressant med ytterligare behandling i form av en enkel tvättning före uppläggning av fraktionen för torkning och/eller ytterligare en trumsiktning efter torkning. Försöken, som utförts under olika årstider, visar också på betydelsen av att behandlingen sker under den varma årstiden för att optimera effekten av sträng-torkningen.

Finfraktionens ("jordfraktion") användbarhet

Behandlingen av uppgrävt avfall genom siktning syftar bland annat till att "slå loss" nedbrutet organiskt material från andra material för att därmed få renare material- och bränslefraktioner och en så ren jordfraktion som möjligt och dessutom en inert grovfraktion (sten, betong med mera).

En stor andel finfraktion efter siktning visar att behandlingen är effektiv. En jämförelse mellan ursprungsavfallens finjordandel (från plockanalyserna) och andelen finfraktion efter siktning ger en indikation om siktningsteknikens effektivitet. I genomförda försök ökar finjordsdelen från ca 15 % i plockanalyserna till över 50 % efter den mest effektiva siktningen se Tabell 2 och Tabell 3.

Den kemiska sammansättningen och lakbarheten hos finfraktionen har undersökts genom analyser beträffande metaller, salter, organiskt material och vissa föroreningar. Sammanlagt har 10 utsiktade jordprover (< 20 och <30 mm) analyserats beträffande totalhalter och lakbarhet. Samtliga analysresultat, se Bilaga 11 och Bilaga 13.

Syftet med undersökningarna har varit att kunna jämförbara uppnådd kvalitet på jordfraktionen med riktlinjer för användning av fraktionen i olika typer av markkonstruktioner. Jämförelser görs även med riktvärden för "mindre känslig markanvändning (MKM), eftersom även dessa värden, något oegentligt, ofta används för bedömning av olika massors användbarhet. I Tabell 7 och Tabell 8 redovisas en sammanställning av analysresultaten på finfraktionen.

Tabell 7. Analyser av den utsiktade finfraktionen (totalhalter) och en jämförelse med riktvärden för användning av avfallsmassor som konstruktionsmaterial (NV Handbok 2010:1)

Totalhalter	Lägsta	Median av 10 prover	Högsta	Nivå för mindre än ringa risk (NV Handbok 2010:1)	Nivå för deponitäckning (NV Handbok 2010:1)	MKM	>MKM
Antimon Sb (Kungsv.)	6	11	32			30	mg/kg Ts
Arsenik As	6,4	8,45	17	10	10	25	mg/kg Ts
Barium Ba	160	215	390			300	mg/kg Ts
Bly Pb	91	120	270	20	200	400	mg/kg Ts
Kadmium Cd	0,25	0,635	1,3	0,2	1,5	15	mg/kg Ts
Kobolt Co	8	10	13			200	mg/kg Ts
Koppar Cu	230	285	1300	40	80	150	mg/kg Ts
Krom Cr	39	64,5	480	40	80	10	mg/kg Ts
Kvicksilver Hg	0,16	0,315	0,48	0,1	1,8	2,5	mg/kg Ts
Molybden Mo (Kungsv.)	7,6	16	29			100	mg/kg Ts
Nickel Ni	28	57,5	420	35	70	120	mg/kg Ts
Vanadin V	18	21,5	31			200	mg/kg Ts
Zink Zn	470	730	2600	120	250	500	mg/kg Ts
Summa PAH-L	0,29	0,68	1,9	0,6	3		mg/kg Ts
Summa PAH-M	7,4	15	25	2	10		mg/kg Ts
Summa PAH-H	9,6	14	24	0,5	2,5		mg/kg Ts
TOC beräknat*	4,80	9,55	17,80				% Ts

*) Gränsvärde för TOC för material under tätskikt i deponi är 10%

Grön = Nivåer för halter mindre än ringa risk uppfylls. Ljusgrön = Nivåer halter vid användning för deponitäckning uppfylls. Gul = Riktvärden för MKM uppfylls. Röd = Riktvärden för MKM uppfylls ej.

Tabell 8. Lakteter på den utsiktade finfraktionen och en jämförelse med nivå för användning av avfallsmassor som konstruktionsmaterial enligt NV Handbok 2010:1

Lakhalter L/S=10 (mg/kg TS)	Lägsta	Median (10 prover)	Högsta	Nivå för användning av avfall som konstruktionsmaterial (NV Handbok 2010:1)	
				Mindre risk än ringa (MRR)	Deponitäckning
Arsenik As L/S=10	0.05	0.08	0.17	0,09	0.4
Kadmium Cd L/S=10	0,004	0,004	0,004	0,02	0,007
Krom Cr L/S=10	0.05	0.05	0.1	1	0.3
Koppar Cu L/S=10	0.2	0,595	0.9	0,8	0.6
Kvicksilver Hg L/S=2	0,0003	0,0003	0,0003	0,01	0.02
Nickel Ni L/S=10	0.26	0.52	2	0,4	0.6
Bly Pb L/S=10	0.05	0.05	0.05	0,2	0.3
Zink Zn L/S=10	0.4	0.4	0.9	4	3
Klorid L/S=10	440	1150	1500	130	11 000
Sulfat L/S=10	2200	6050	10 000	200	8500

Grön = Nivåer för urlakning "mindre risk än ringa" uppfylls. Ljusgrön = Nivåer för urlakning vid användning som deponitäckning uppfylls

Analyserna visar att totalhalterna i finfraktionen som medianvärde för de flesta parametrarna uppfyller de generella nivåerna för användning i deponitäckning, undantag är koppar och zink. Även riktvärdena för ”mindre känslig markanvändning” underskrids för alla parametrar utom koppar och zink. TOC-halten (andelen organiskt bundet kol) i jordfraktionen har betydelse för bedömning av om materialet bör kunna utnyttjas i terrasseringar under tätskiktet på en deponi, där gränsen generellt ligger på 10 %. I föreliggande försök ligger TOC-halten som medianvärde strax under 10 %.

Laktesterna visar att metallerna är hårt bundna till materialet och att halterna i den fränsiktade finfraktionen understiger de generella nivåerna för användning som deponitäckning. För ”fri användning” (mindre risk än ringa) generellt krävs även att urlakningen av salter är låg, vilket inte uppfylls av de i projektet analyserade proven. Även urlakningen av nickel är något högre än nivån för fri användning.

Variationerna i analysvärden är betydligt lägre beträffande lakningsegenskaper än beträffande totalhalter, där enstaka metallpartiklar kan få stort genomslag i analysvärdet.

Sammantaget visar försöken och analyserna att en jordfraktion användbar i sluttäckningar av deponier kan tas fram med tillämpad teknik. För användning över tätskiktet eller fritt (utanför deponin) bör platsspecifika bedömningar göras och hänsyn tas till bedömd framtida markanvändning. Om risken för yt- och grundvatten är styrande blir i första hand lakningsegenskaperna viktiga. Om hälsorisker vid intag eller skyddet av markmiljön är styrande blir totalhalterna viktigare att beakta vid användning av massorna.

För att ytterligare förbättra kvaliteten på jordfraktionen kan kompletterande behandling behövas, till exempel torkning och separering av metallpartiklar med virvelströmsteknik (”Eddy Current”), något som tillämpas i metallåtervinningsbranschen för avskiljning av icke-magnetiska metaller (t ex koppar, aluminium).

Tung fraktion, efter vindsiktning

Efter vindsiktning erhålls en lätt fraktion (”bränsle”) och en tung fraktion bestående av sten, grus, betong, större vattenmättade träbitar m m, Figur 18 och 19. För en klassificering av den tunga fraktionen från vindsiktningen plockanalyserades ca 625 kg av fraktionerna > 80 mm och 20–80 mm. Resultat, se Figur 20 och Tabell 9.



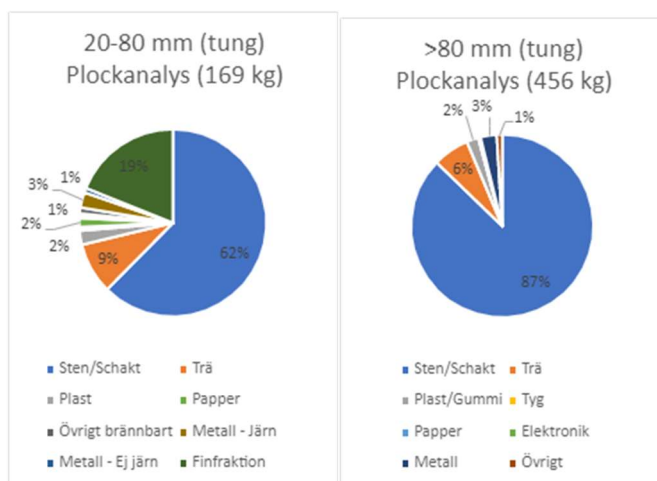
Figur 17. Plockanalys av de tunga delfraktionerna efter vindsikt, 20-80 mm och >80 mm.



Figur 18. Finfraktion (<20 mm) och grovfraction (>80 mm) efter trumsikt och vindsikt



Figur 19. Tunga fraktioner efter vindsiktning, > 80 mm respektive 20-80 mm



Figur 20. Fördelning efter materialtyper, plockanalys tunga fraktioner efter vindsiktning

Tabell 9. Resultat av plockanalys, tung fraktion 20-80 mm respektive >80 mm

Material	20-80 mm (%)	> 80 mm (%)	Anm
Sten/schakt	62	87	
Trä	9	6	
Plast	2	2	
Papper	2	-	
Övrigt brännbart	1	3	
Metall, järn	3	1	
Metall, icke-järn	1	1	
Finfraktion	19	0	

I båda tunga fraktionerna dominerar som förväntat innehållet av oorganiskt material (sten/schakt). Organiskt material utgörs i huvudsak av trä.

Den höga andelen finmaterial i fraktionen 20–80 mm är en konsekvens av överbelastning i trumsikt nr 2 där <20 mm material ska avskiljas från < 80mm-fraktionen från trumsikt nr 1. För att minska denna effekt krävs en längre trumma, långsammare matningshastighet eller en större sållstorlek (som samtidigt skulle innebära en risk för sämre kvalitet på finfraktionen).

Vid plockanalysen kunde konstateras att huvuddelen av finfraktionen förekom som löst material men även som förorening på de andra fraktionerna och frigjordes i samband med hanteringen.

Målsättningen med utsorteringen av de tunga fraktionerna, som tillsammans utgör > 20 % av behandlat avfall, är förutom att förbättra kvaliteten på bränslefraktionerna, även att få fram en oorganisk fraktion, användbar i konstruktioner på deponin. För att säkerställa användbarheten bör andelen organiskt material understiga 10 volym-%, vilket överslagsmässigt bedöms ha uppnåtts med tillämpad teknik (trumsiktning i två steg och vindsiktning), se Figur 13 och Figur 21.



Figur 21. Trumsiktning med såll 20 mm. Överbelastning av sikten riskerar medföra att finmaterial följer med till fraktionen >20 mm.

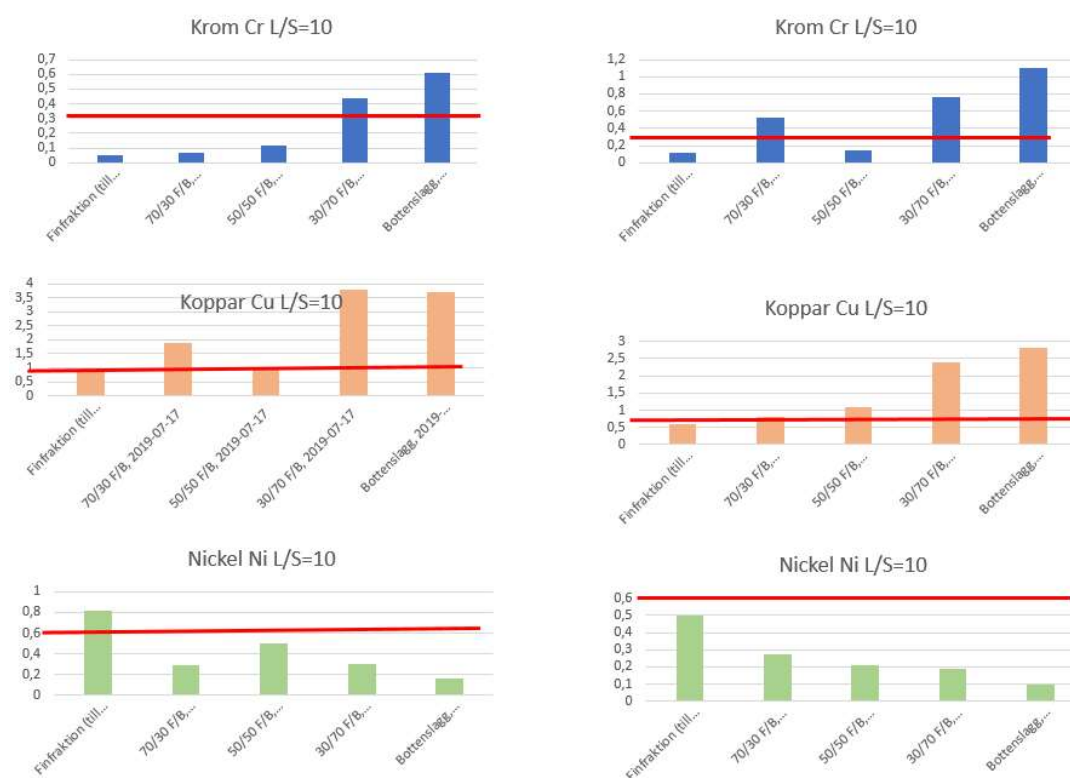
Stabilisering av finfraktion tillsammans med slaggrus?

Möjligheterna till återvinning av avfallsklassade massor i anläggningsarbeten kan styras av totalhalter och/eller lakningsegenskaper. Två material från avfallsbranschen som långsiktigt kommer att kräva ett omhändertagande är slaggrus från återvinning av metaller ur bottenaska från avfallsförbränning och sannolikt finfraktionen från landfyll mining när deponiåtervinning blir etablerad i större skala.

Båda fraktionerna är aktuella för NSR och ett inledande försök gjordes därför inom ramen för deponiåtervinningsprojektet för att undersöka hur lakningsegenskaperna för att antal metaller kan påverkas genom blandning i olika proportioner av finfraktionen (<20 mm) från siktning av massor från landfyll mining med slaggrus.

I slaggruset utgör erfarenhetsmässig framförallt lakningsbenägenheten för krom och koppar en begränsning för en friare användning och i finfraktionen från landfyll mining kan risken för urlakning av koppar och nickel vara ett problem enligt analyser i pågående projekt. Analysresultat, se Bilaga 12.

Resultat av några analyser gjorda i projektet indikerar att blandningen av materialen eventuellt kan ha en stabiliserande effekt beträffande laknings-egenskaperna, se Figur 22. Ytterligare undersökningar krävs för en eventuell verifiering av resultaten.



Figur 22. Analys av lakningsegenskaper hos blandning av slaggrus och finfraktion från deponiåtervinning i olika proportioner

Lokal miljöpåverkan av Landfill Mining?

Generellt innebär hantering av avfall alltid vissa risker för lokal miljöpåverkan. I ett landfill mining projekt är riskerna i huvudsak att utsläpp till luft (metan, luktspridning) ska öka, att yt- och/eller grundvatten påverkas eller att buller från utrustning och trafik orsakar störningar för omgivningen.

Risken för störningar beror också på anläggningens lokalisering och närheten till bostäder och annan verksamhet. I detta fall har efterbehandlingen av avfallet skett inom avfallsanläggningen, vilket innebär att avståndet till bostäder och andra verksamheter bedöms vara betryggande. Enligt miljöbeslutet för anläggningen är Landfill Mining en process som omfattas av tillståndet.

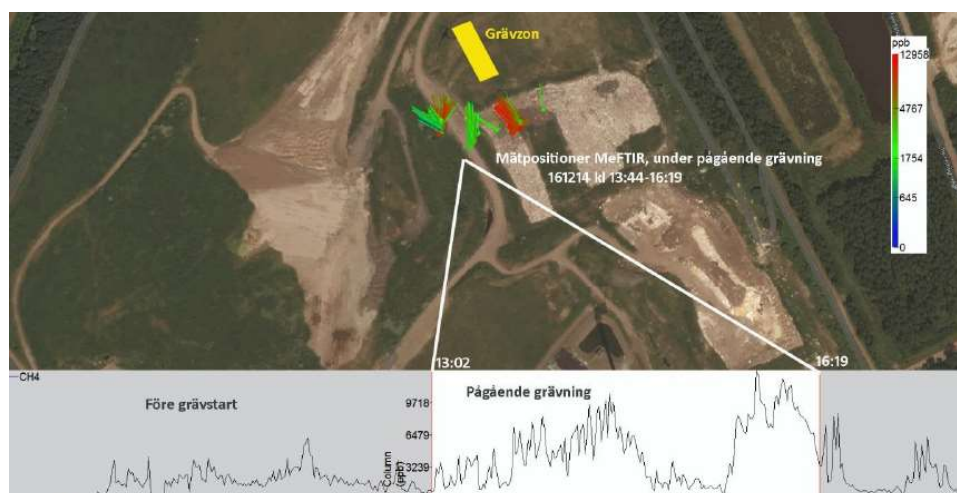
Utsläpp till luft

Tidigare mätningar av metanavgång

Inför genomförandet av pilotprojektet 2016/2017 konstaterades att dokumenterad kunskap om utsläpp till luft från landfill mining i princip sakades. I projektet ingick därför mätning av metanavgång före, under och efter själva urgrävningarna och hanteringen av urgrävt avfall.

Mätningarna utfördes av Fluxsense AB, med hjälp av spårgasteknik och mätning av halter i omgivningsluften i vindriktningen från platsen för urgrävningarna. Mätningar gjordes dels i plymen från deponin, dels över själv utgrävningsområdet. Resultaten indikerade att metanemissionen från anläggningen ökade marginellt i samband med det aktiva grävarbetet, från 77,6 (+/-10,2) kg/h till omkring 82,2(+/-5,7) kg/h. Uppmätt ökning låg inom respektive mätseries variabilitet (Fluxsense, 2017).

Mätningarna i direkt avslutning till urgrävningen (i vindriktningen från området) visade att en viss emissionshöjning kunde spåras från den aktiva grävfasen. Samtidigt visade resultaten att emissionen snabbt klingar av när den aktiva grävningen upphör, vilket indikerar att emissionen i huvudsak kommer från själva hanteringen av avfallet och inte från schaktet som sådant. Se Figur 23. Resultaten kan tolkas som att emissionerna i huvudsak kommer från inkapslad gas i materialet som frigörs vid hanteringen och inte från aktiv nedbrytning i cellen.



Figur 23. Resultat av koncentrationmätningar av metan i vindriktningen från urgrävningen före, under och efter aktiv grävning under pilotprojektet (från Deponiåtervinning, Pilotprojekt, NSR, 2017)

Mätning av metanavgång 2018

I samband med de aktuella urgrävningarna har in situ-mätningar av metanavgång utförts av Sweco (se Bilaga 4) i samband med urgrävning och hantering av massorna. Mätningar har skett genom ”sniffning” på ytan, med porgassond i upplagt avfall och med fluxbox, (mätning av koncentration och flöde av metan från en bestämd yta), se Figur 24.



Figur 24. Metanmätning in situ (sniffning, porgassond, fluxbox), Sweco, 2018

Mätningarna från den första fasen av urgrävningarna i projektet verifierar till stor del resultaten från mätningarna 2016. Avgången av metan från schakt och upplagda strängar av siktat avfall är låg och i princip inte kvantifierbar. En viss metanbildning kunde konstateras i strängar med finare material genom mätning med porgassond. I schaktbotten kunde förhöjda metanhalter konstateras på ytan i några punkter genom ”sniffning”. Med fluxbox-mätningarna kunde inte någon signifikant metanavgång påvisas.

Lukt?

Erfarenheterna från pilotförsöket var att inga luktproblem uppstod vare sig på anläggningen eller i omgivningen.

Inte heller under det nu genomförda projektet har urgrävning, siktning och övrig hantering orsakat några luktstörningar, vare sig på arbetsplatsen eller för omgivningen.

Att lukt inte utgjort något problem kan sannolikt förklaras av att nedbrytningen av lättflyktiga ämnen, inklusive svavelväte, som normalt är de föreningar som kan orsaka luktemissioner, varit i det närmaste fullständig under behandlingen i biocellreaktorn. Samtidigt har gasuttaget från cellen pågått även under projektet, vilket även minskat risken för avgång till atmosfären av deponigas. Vid tidigare mätning av gasbildningspotentialen i BCR-avfallet (Karlsson, Åslund, 2014) konstaterades att potentialen då var så låg att den inte var mätbar i konventionella labbförsök.

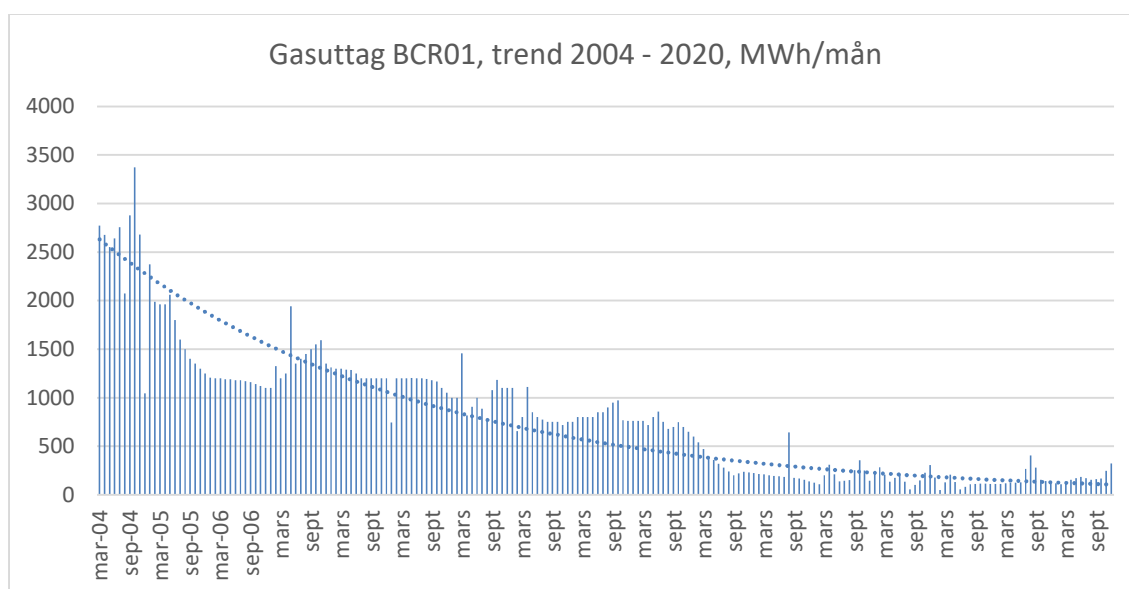
Resultaten bekräftar att urgrävning och efterbehandlingen av urgrävt avfall från biocellreaktorerna (torkning, stabilisering, efterkompostering) kan ske relativt öppet utan risk för vare sig betydande metanavgång eller luktstörningar, vilket är betydelsefullt inför planering av ett eventuellt fullskale-projekt.

Gasuttag

Uttaget av deponigas mäts inom ramen för egenkontrollen. Kontrollen under perioden 2018–2020 visar inte på någon signifikant påverkan på uttaget till följd av urgrävningarna, Figur 25.

Totalt sett sjunker uttaget från cellen kontinuerligt till följd av att allt mindre gasbildande material återstår. Plockanalyserna visar att det ursprungliga, lättnedbrytbara materialet sedan länge har förbrukats och att återstående gaspotential utgörs av annat organiskt material med betydligt lägre nedbrytningstakt (i huvudsak trä och vissa textilier).

Till reglerstationen för BCR01 (RB13) är 13 separata uttagsledningar kopplade, vilka tar gas från olika delar och djup i cellen. I reglerstationen styrs undertrycket i varje ledning separat för att optimera uttaget och suga gas från de delar av cellen som är aktiva. För att minska risken för inläckage av syre sker inget uttag ur den del av systemet som förväntas kunna påverkas av grävningen. Uttagssystemet illustreras Figur 14 och på ritningar i Bilaga 2. *Relationsritningar, urgrävning BCR01, 2018 – 2020.*



Figur 25. Månatligt uttag av energi (metan i deponigasen) från BCR01 enligt mätningar 2004 – 2020

Mätningarna under pågående projekt, liksom under pilotprojektet 2016-2017, indikerar att gasuttag från cellen kan fortsätta även under en fullskalig urgrävning, om hänsyn tas till uppsamlingssystemets uppbyggnad och om gasdräner som friläggs successivt kopplas bort för att undvika att luft sugas in i systemet. Uttaget från övriga ledningar kan styras efter metan- och syrehalt.

Lakvatten

Den lakvattenbildning som sker i cellen bedöms vara liten på grund av tätskiktet över inlagt avfall (plastmembran, HPDE-duk). Vid uppstart och i ett tidigare skede av behandlingen i biocellreaktorn kunde vatten tillföras via ett särskilt inlagt bevattningssystem under tätduken, för att optimera fukthalten och nedbrytningen av avfallet.

Prover på lakvatten har tagits både före och efter pilotförsöket 2016/2017 och i anslutning till de nu avslutade försöken. Ett syfte med provtagningarna har varit att se om kvaliteten på lakvattnet påverkas av förändringarna från anaerobi till potentiellt

aeroba förhållanden i den öppna schakten genom kontakten med luft. Bl a kan pH och lösligheten för olika metaller påverkas av oxidationsförhållandena,

I Tabell 10 redovisas vissa av analysresultaten från utförda provtagningar 2016 – 2019. Samtliga analysresultat finns i Bilaga 10.

Tabell 10. Analysresultat på vatten från rören BCR2 och BCR3 schaktgropen, i anslutning till utförd piloturgrävning 2016 och urgrävning 2018–2020

	Före urgrävning		Under pågående urgrävning		Efter urgrävning och återfyllning		Prov från gv-rör BCR3, före, under och efter urgrävning 2018–20			Vatten stående i schaktgropen
Provtagnings-datum	161213	161213	161216	161216	170505	170505	181003	181015	190430	190430
(mg/l)	BCR2	BCR3	BCR2	BCR3	BCR2	BCR3	Före	Under	Efter	Efter
pH	8,4	8,4	9,1	8,7	8,3	8,3	8.3	8.1	8.2	7.9
Kond, mS/m	2 960	2 840	2 910	2 880	3 190	2 790	2.89	2.9	2.72	2.8
Susp	86	34	140	77	140					
Alkalinitet	17 000	11 000	18 000	15 000	18 000	14 000	20 000	11000	13 000	3500
klorid	2 600	2 800	2 800	3 200	2 800	2 900	2500	2100	2300	870
Sulfat	<10	<10	<10	<10	1,5	24	36	26	40	610
TOC	2 400	2 400	2 200	2 400	2 400	2 100	1700	1600	1700	330
BOD7	410	380	270	280	600	490				
NH4-N	2 500	2 400	2 600	2 500	2 800	2 000	2100	1900	2200	370
NO2+NO3-N	<0,50	<0,20	<0,50	<0,20	<0,10	<0,10	<0,20	6.1	<0,20	5.4
Tot-N	3 600	3 600	2 400	4 200	4 200	3 400	2300	2200	2400	910
Fosfor	41	42	37	38	51	36	40	35	28	2.1
Järn	33	24	61	23			7400	5800	9100	3100
Arsenik	0,049	0,087	0,068	0,080			0,054	0,046	0,065	0,015
Bly	0,044	0,023	0,041	0,027			0,015	0,013	0,016	0,0098
Kadmium	<0,0010	<0,0010	0,0061	0,0064			0,0004	0,0026	0,00004	0,00034
Kobolt	0,068	0,055	0,074	0,057			0,042	0,036	0,044	0,022
Koppar	0,15	0,17	0,10	0,046			0,01	0,0092	0,022	0,11
Krom	0,72	1,3	0,63	1,4			0,93	0,83	0,9	0,069
Hg	0,00015	<0,00010	0,00029	0,00011			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Nickel	0,35	0,38	0,34	0,39			0,29	0,25	0,28	0,2
Tenn	0,43	0,31	0,29	0,29			0,18	0,17	0,22	0,0065
Zink	0,45	0,38	0,44	0,29			0,16	0,12	0,39	0,32

Slutsatserna efter försöken 2018/2020 är desamma som efter pilotprojektet. Grävningen i celler tycks knappast ha påverkat lakvattnets sammansättning. Analyserna visar att det råder anaeroba förhållanden i cellen. Det oorganiska kvävet föreligger i princip uteslutande i form av ammonium (omkring 2 000 mg/l) medan detekterbara halter av nitrat endast noterats vid ett tillfälle (6 mg/l).

pH i lakvattnet ligger över 8 och metallhalterna är, med undantag för järn, genomgående relativt låga, trots att totalhalterna i avfallet i vissa fall är höga (bly, koppar, krom,

nickel). De låga halterna i lakvattnet överensstämmer med resultaten från laktesterna som genomgående visat att lakbarheten för metaller i avfallet är låg.

Vatten som samlas i schaktet bedöms, med hänsyn till sammansättningen, i huvudsak utgöras av nederbörd och till mindre del av utträngande lakvatten. Vid en fullskalig urgrävning är länshållning och omhändertagande av stående vatten sannolikt nödvändigt.

Utvärdering av miljö och ekonomi

Data från urgrävning, sortering och behandling av mer än 5 000 ton avfall i BCR 01 2018–2020 har utnyttjats som underlag för att analysera ekonomiskt utfall och positiva eller negativa bidrag till global miljöpåverkan vid en urgrävning av NSR:s båda biocellreaktorer. Beräknad avfallsmängd i reaktorerna bedöms idag till ca 150 000 ton efter den nedbrytning och gasproduktion som skett.

För analysen utnyttjas ett modelleringsverktyg där förutom fältdata även olika parametrar för kostnader och klimatpåverkan från bränslen, jungfrulig resursutvinning, transporter, m m utnyttjas.

För att kunna göra en utvärdering av miljö- och ekonomiprestanda har modeller över de tre olika separeringsuppställningarna som testats ställts upp. Materialflöden till olika fraktioner i modellerna baseras på resultat från de fullskaliga fälttesterna.

Ingångsdata för de ekonomiska beräkningarna utgörs, förutom av sorteringskapacitet och erhållna materialfraktioner, av uppgifter om driftkostnader för utnyttjad utrustning, energianvändning och kostnader/intäkter för avsatt material efter sortering.

Kostnads- och intäktsuppgifter har angetts som intervall för att representera variabiliteten och osäkerheten i tillgängliga data. Kostnads- och intäktsuppgifter kommer från dels själva försöken, dels från NSR:s ordinarie drifterfarenheter.

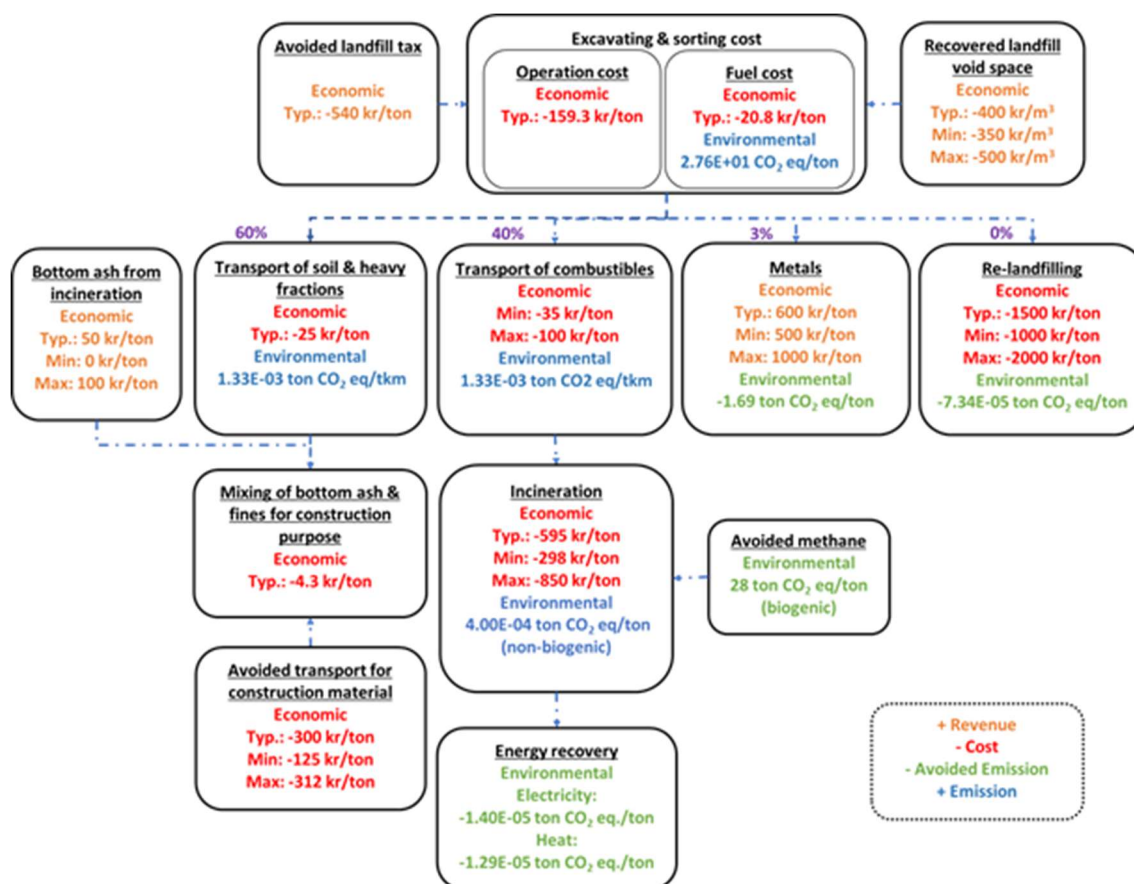
De fullständiga resultaten från de tre modelleringarna redovisas i Bilaga 6. Nedan redovisas modelluppställning och resultat från det fältförsök som bedömdes ge bäst resultat, kapacitets- och kvalitetsmässigt, vilket var utnyttjande av två trumsiktare i serie och vindsiktare på de grövre fraktionerna (>80 mm respektive 20–80 mm). Ingångsdata redovisas i Figur 26.

I den ekonomiska analysen har fokus varit att bedöma utfallet för NSR som enskild aktör. Inga samhällsekonomiska kalkyler har gjorts. ”Undvikna kostnader” utgörs i modellen av kostnader som skulle uppstå om deponiåtervinning inte skulle ske. Dessa består i huvudsak av sluttäckningskostnader, lakvattenbehandling, gasuppsamling och deponiskatt för kvarvarande material. En viktig aspekt i modelleringen är hur nytt deponiutrymme värderas. När biocellens material med relativt låg densitet (ca 0,65 ton/m³ enligt pilotprojektet) grävs upp frigörs utrymme för nytt avfall. I modellberäkningen antas att nytt material till deponering kommer att ha högre densitet (sannolikt oorganiskt avfall, förorenade jordar med antagen densitet 1,3 – 1,6 ton/m³). Då deponeringsutrymmet bör värderas per ton möjligt, mottaget avfall är vikt/volym-förhållande en viktig aspekt i beräkningarna.

Beräkningar av klimatpåverkan har gjorts i form av livscykelanalyser för ingående material och den energi som behövs eller genereras via behandlingen av det uppgrävda

avfallet. I de fall användbar energi eller material har genererats av behandlingen så har vi använt systemexpansion och räknat med att andra resurser undviks att produceras vilket därmed genererar en nytta för systemet. För förbränning har vi antagit att fjärrvärme från avfall och el från svensk medelmix ersätts. För metaller antas att jungfrulig produktion av metaller med låg kvalitet ersätts. Bakgrundsdata för material och energi kommer ifrån databasen Ecoinvent (cf. Wernet et al, 2016). För beräkningar av framtida metanutsläpp från biocellreaktorerna om utgrävning inte sker har IPCCs modell använts tillsammans med en fördelning över hur mycket organiska material som cellen antas innehålla.

För att studera osäkerheten i resultaten så görs en så kallad Monte-Carlo analys med 1000 körningar av modellen där varje parameter slumpmässigt varierar inom sitt intervall i varje körning. Därefter görs en global känslighetsanalys för att analysera vilka parametrar som påverkar resultaten mest.



Figur 26. Schematisk modell över indata för uppställning med två trumsiktare i serie och vindsiktning av fraktionerna > 80 mm och 20–80 mm.

Utvärdering av klimatpåverkan

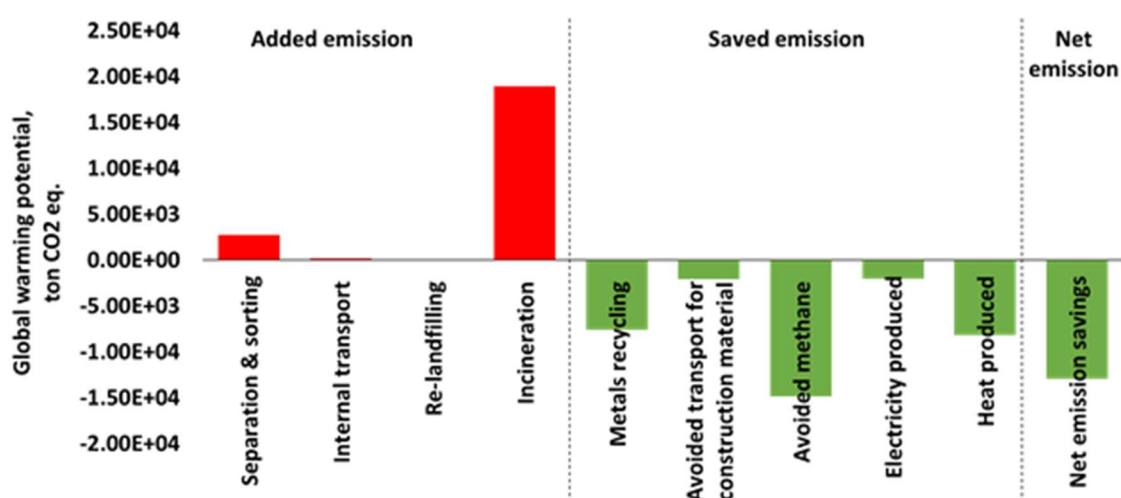
I Figur 27 visas resultaten över medelvärdet för klimatpåverkan av ett landfill mining projekt där upplagt avfall i båda biocellreaktorerna, ca 150 000 ton, behandlas med två trumsiktare i serie och vindsiktning av de större fraktionerna.

Resultaten från modelleringen indikerar att ett sådant landfill mining-projekt skulle ge en nettopositiv klimatnytta. Två processer ger upphov till ökad klimatpåverkan medan fem olika processer ger substantiella, undvikta emissioner.

Störst bidrag till klimatpåverkan ger den i modellen antagna förbränningen av den lätta fraktionen då den innehåller en stor andel plast. De undvikta emissionerna från producerad värme och el kompenserar inte för de genererade emissionerna från förbränning av den fossila plasten.

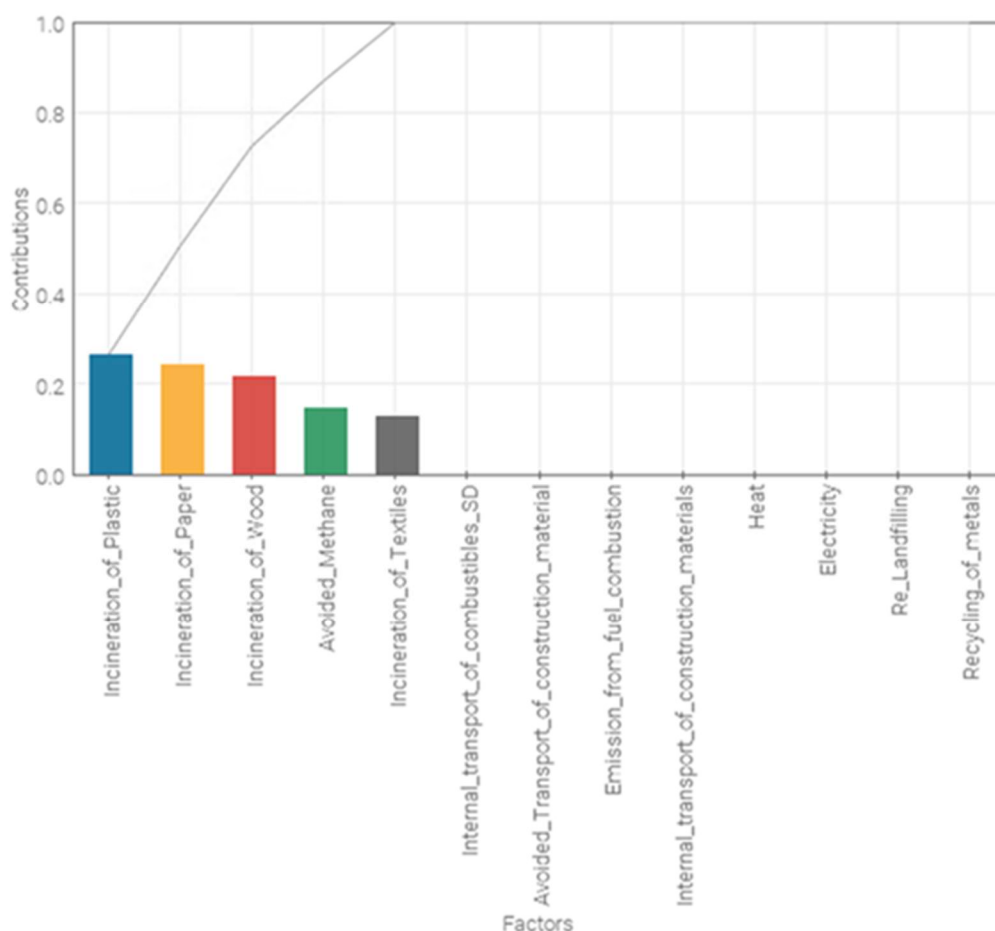
Störst undvikna emissioner ger återvinningen av metaller, undvikta metanutsläpp samt undvikna emissioner från den värmeproduktion som ersätts genom projektet. Siffrorna för återvinning av metaller är osäkra då det inte utförts några tester inom projektet med magnetseparation för uppställningen med två trumsiktare och vindsikt. Detta har lett till att det är antagna värden som har använts.

Det är viktigt att poängtera att utsläppen som värderas sker vid olika tidpunkter. Framförallt undvikta metanutsläpp är något som sker under en antagen tidsrymd på 100 år enligt IPCC:s modell.



Figur 27. Klimatpåverkan fördelat på olika processer för uppställningen två trumsiktare i serie och vindsiktning av fraktionerna > 80 mm och 20-80 mm.

I en känslighetsanalys kan belysas hur variationen av olika parametervärden påverkar utfallet, i detta fall klimatpåverkan. Den faktor som helt dominerar utfallet är i detta fall effekten av förbränning av utsorterat material (plast, papper, trä, textil), se Figur 28. Emissionerna från förbränning är så stora i förhållande till andra emissioner att möjliga/rimliga variationer beträffande andra faktorer i stort sett blir betydelselösa för känslighetsanalysen.



Figur 28. Kritiska faktorer från den globala känslighetsanalysen

Landfill mining som kolsänka?

Eftersom de uppkomna klimatgasemissionerna i huvudsak kommer från förbränning av ”bränslefraktionen” så kan det vara intressant att analysera ett scenario där den utsorterade bränslefraktionen, som till stor del utgörs av fossilbaserad plast, istället skulle återdeponeras eller att plastandelen skulle separeras ut, renas och återanvändas i plastindustrin. Skulle detta skapa en kolsänka?

Vid beräkningen av tillkommande klimatpåverkan vid förbränning har endast emissioner från de svårnedbrutna trä- och plastfraktionerna tagits med då papper och textilier antas brytas ned ändå och i slutändan generera klimatgaser. Vid förbränningen genereras även en nytta i form av att el och värme produceras som antas ersätta annan produktion.

När det gäller återdeponering av hela ”bränslefraktionen” har istället antagits att textilier och papper långsiktigt bryts ned och genererar en deponigas bestående av metan och koldioxid, medan trä och plast antas bli kolsänkor. IPCC:s modell för beräkning av metanemissions-potentialer har använts och vidare ett antagande om att 80% av bildad metan samlas in och går till el och värmeproduktion.

Ett tredje alternativ är en separation av plast från bränslefraktionen vilket skulle kunna leda till att en återvinningsbar plastfraktion ersätter användning av ”jungfrulig” plast.

Därigenom skulle klimatgasemissioner från annan plastproduktion undvikas. Överslagsmässigt skulle detta kunna leda till en nettominskning av klimatpåverkan. Siffrorna ger bara en indikation om effekten, då de storskaliga, tekniska möjligheterna att få fram en ren plastfraktion inte har undersökts närmare i detta projekt.

Med dessa antaganden visar Tabell 11 att återdeponerings-alternativet genererar större klimatpåverkan än förbränningsalternativet, även om intervallen delvis är överlappande. Plaståtervinningsalternativet skulle, som framgår av tabellen, ge en stor reduktion av nettoemissionen av växthusgaser.

Miljöpåverkan av den vidarebehandling av plastfraktionen som skulle krävas har inte kunnat modelleras, eftersom någon sådan teknik inte testats i större skala. Enkla tvätförsök, se Tabell 4 och Tabell 5, har dock visat att plast-fraktionen viktmässigt skulle kunna reduceras väsentligt, i storleksordningen 30–40 %, vilket även om platsen inte skulle nå tillräcklig kvalitet för materialåtervinning skulle ge ett ekonomiskt incitament i och med den minskade kostnaden för förbränning.

Tabell 11. Klimatpåverkan (i kton CO₂ eq.) för olika hantering av den brännbara fraktionen som skulle uppstå vid utgrävning av NSR:s biocellsreaktorer enligt scenariot trum- och vindsiktning.

		Förbränning	Återdeponering av brännbar fraktion	Plaståtervinning plus förbränning av trä^{*)}
Direkta emissioner	kton CO ₂ eq	18,9 - 25,5 <i>från trä och plast</i>	14,9 - 20,0 <i>Från anaerob nedbrytning av papper & textilier ^{*)}</i>	8,4 - 11,9 <i>från trä</i>
Undvikta emissioner från värme- och elproduktion	kton CO ₂ eq	-10,2 - -13,7	-0,9 - -1,3	-4,4 - -6,2
Undvikta emissioner från plastproduktion	kton CO ₂ eq	N/A	N/A	-9,7 - -13,0
Nettoemissioner	kton CO ₂ eq	8,7 - 11,8	14,0 - 18,7	-5,7 - -7,3

^{*)} Antagen metaninsamling 80 % ^{**) Emissioner från utsortering/vidarebehandling av plasten är inte medräknad}

Utvärdering av ekonomi i landfill mining

Den ekonomiska utvärderingen av landfill mining enligt den i projektet testade tekniken visar på ett positivt resultat, främst beroende på att nytt deponiutrymme skapas och att deponiskatt kan undvikas. Då inget material förväntas behövas återdeponeras kommer nytt deponiutrymme att skapas för avfall/förorenade massor med högre densitet än det urgrävda. För mottagna massor förväntas marknadsmässiga mottagningsavgifter kunna tas ut och ge en intäkt på ca 400 kr/ton.

Deponiskatt är en betydande, potentiell kostnad (idag 540 kr/ton) som undviks om avfallet återvinns, vilket också återspeglas i resultatet.

På kostnadssidan dominerar den direkta kostnaden för avsättning av bränslefraktionen, där mottagningsavgifterna idag är ca 595 kr/ton avfall, i stort sett oberoende av kvalitet. Det vill säga en "förädling" av bränslefraktionen ger en minskad kostnad enbart genom viktreduktionen. Ökat värmevärde, eller lägre fukt- och askhalt premieras inte av marknaden genom lägre mottagningsavgift.

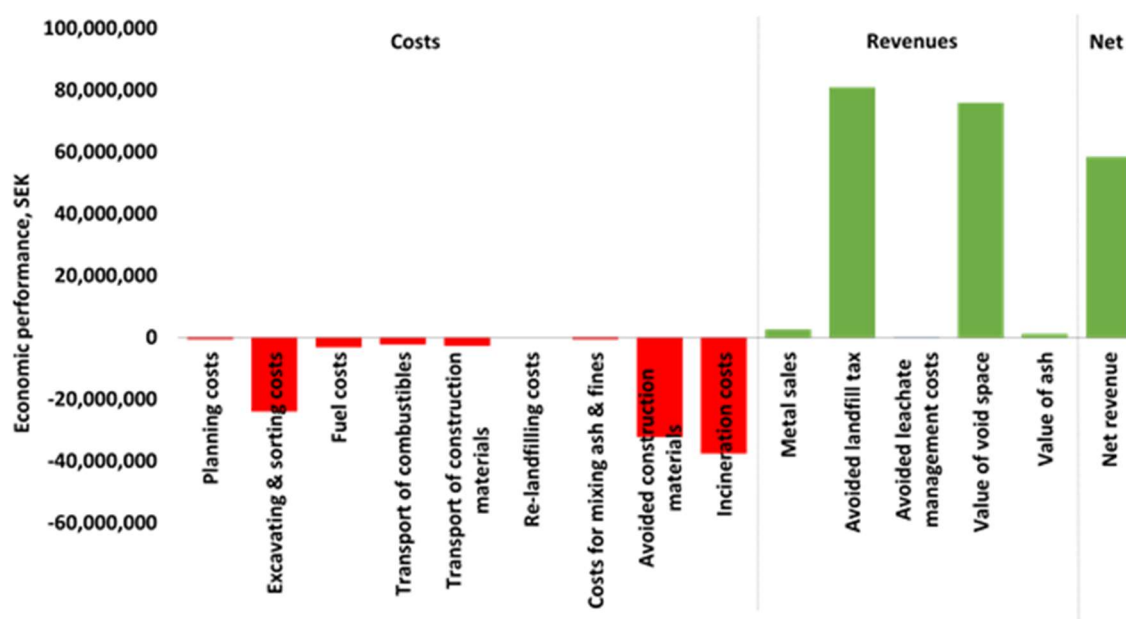
Produktionen av ”konstruktionsmassor” orsakar enligt modellen en utebliven intäkt genom att mottagning av denna typ av massor normalt sker mot en avgift i storleksordningen 300 kr/ton.

Själva urgrävning och behandlingskostnaden enligt framtagna teknik, ca 160 kr/ton, är den tredje tunga kostnadsposten i modellberäkningen. Det samlade ekonomiska resultatet enligt modellberäkningen är sammanställt i Figur 29.

Generellt är det ekonomiskt positivt med en teknik som skapar en mindre bränslefraktion och en större finfraktion, användbar för konstruktioner på eller utanför deponin. Uppställningen med två trumsiktare i serie och två vindsiktare för att separera tungt material från bränslefraktionen har i projektet visat sig vara fördelaktig såväl kapacitets- och kvalitetsmässigt som ekonomiskt.

Den enda materialfraktion som bedöms kunna återvinnas med ett positivt värde är en magnetisk metallfraktion, även om kvaliteten och därmed även värdet blir lågt. En förbättringspotential finns genom anpassning av utsorteringstekniken.

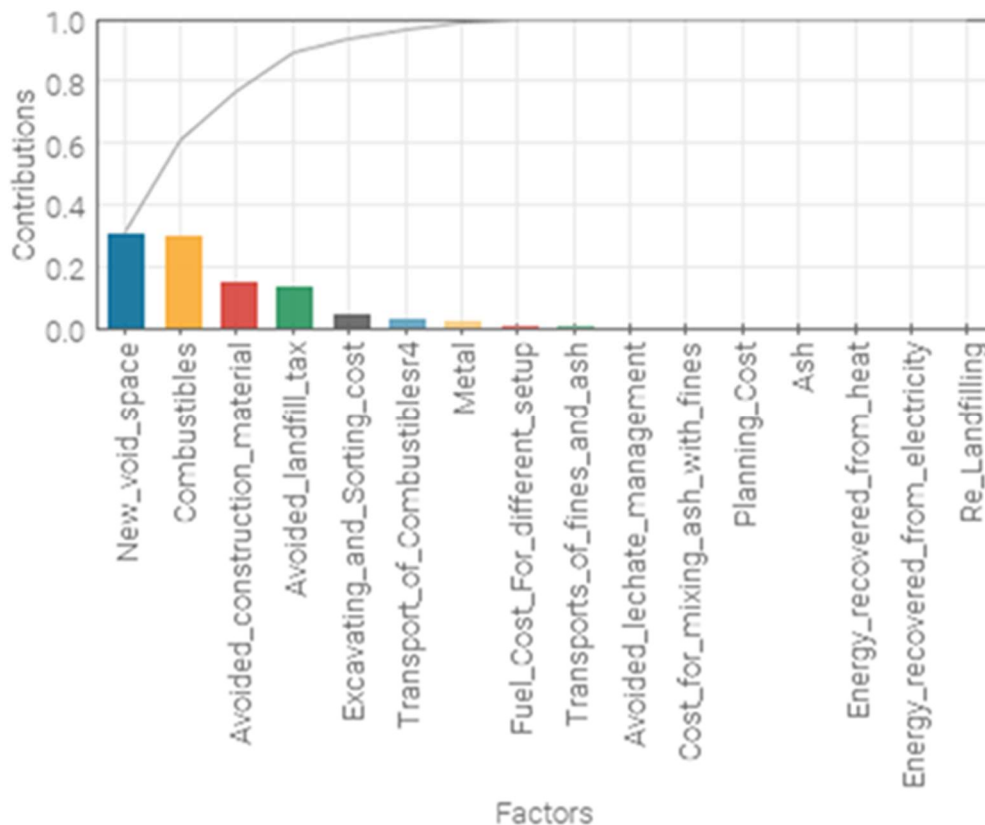
Samtidigt är resultaten beroende av att finfraktionen går att använda som konstruktionsmaterial. Om delar av denna fraktion skulle behöva återdeponeras kommer det att påverka både posten ”undvikt deponiskatt” och intäkterna för tillskapat deponiutrymme och samtidigt generera en kostnad för deponering.



Figur 29. Kostnader och intäkter fördelat på olika processer för uppställningen med två trumsiktare i serie och vindsiktning av fraktionerna >80 mm och 20–80 mm.

Den globala känslighetsanalysen (se Figur 30) visar att variationer för fyra faktorer tillsammans förklarar c:a 85% av förändringar i utfallen i de olika Monte Carlo-simuleringarna nämligen, det antagna priset för nytt deponiutrymme, mottagningspriset för brännbart fraktionen, mottagningspris för konstruktionsmaterial som inte kommer NSR till del när de utsorterade fraktionerna istället används samt deponiskatten. Intäkter för nytt deponiutrymme antas variera beroende på olika densitet för inkommande avfall och mottagningspriset är beroende av hur mycket annat brännbart material som den

uppgrävda fraktionen konkurrerar med. Liten konkurrens ger låg kostnad medan hög kan innebära att fraktionen behöver fraktas och förbrännas vid en annan anläggning. Det externa konstruktionsmaterialet antas variera beroende på kvalitet och tidigare användningsområde och deponiskatt har varierats med tänkbara förändringar som har diskuterats kunna ske.



Figur 30. Resultat för den globala känslighetsanalysen för faktorer som påverkar det ekonomiska utfallet. Den kumulativa kurvan visar hur olika faktorer påverkar den totala variationen av utfallet.

Resultat i relation till aktuell forskning

Flera av projektets unika delar behandlades redan i pilotstudien. Det är viktigt att poängtera att detta är det enda dokumenterade projekt där en biocellsreaktor har grävts upp och till det läggs det speciella villkoret med en risk för omklassning till deponi med tillhörande deponiskatt. Just att det är ett försorterat avfall som förvarats och sedan grävts upp gör att materialfördelningen ser annorlunda ut än för de flesta andra studierna av uppgrävda deponimaterial vilket påverkar hur resultaten kan bedömas vara generaliserbara.

Något som har påtalats ofta i de större genomförda litteraturstudier av landfill mining är bristen på större projekt med ett iterativt lärande genom en gradvis förändring av exempelvis separationstekniker (Krook et al, 2012; Blasenbauer, 2020). Detta är något som detta projekt i kombination med pilotstudien har utfört med olika justeringar av separationstekniker som gradvis ökat separationseffektiviteten.

Det finns speciellt ett par olika delar som anses tillföra nya intressanta lärdomar som kan vara intressanta även för andra kommande projekt och som inte togs upp i så stor grad i pilotstudien eller har studerats utförligare i detta projekt.

Det första berör möjligheten för någon form av avsättning för den jordlika finfraktionen. Det är ett av de största problemen för att få till ett rimligt ekonomiskt resultat då en återdeponering kan innebära att en deponiskatt läggs på (Frändegård, 2015). Finfraktion är platsspecifik och har i tidigare studier definierats på många olika sätt med storleksordningar för fraktionen som varierar mellan 4-40mm (Chandana et al, 2020). I denna studie har huvudfokuset varit på att undersöka om det går att använda finfraktionen, som i denna studie varierar mellan att vara fraktionen mindre än 20 eller 30 mm, som konstruktionsmaterial inom deponiområdet där den ekonomiska analysen har utgått från användning som deponitäckning antingen över eller under tätskikt.

I pilotstudiens slutrapport rapporteras att riktvärden för användning av denna typ av material ser väldigt olika ut i olika delar av Europa där Sverige har hårdare krav än flera andra länder (Rönnols et al, 2017). Precis som ett flertal andra studier så har de olika proverna av finfraktionen svårt att klara riktvärden för totalhalter av flera metaller (cf. Vollprecht et al, 2020) medan lakbarheten ligger under för alla metaller men för nickel nära riktvärden för användning som deponitäckning. Det är dock fortfarande osäkert hur regelverken kommer tolkas i ett fullskaligt projekt och det skulle vetenskapligt vara intressant att följa hur beslutsprocessen för detta ser ut via en nästa fas av projektet.

I skrivande stund är vi inte medvetna om några andra studier som har testat stabilisering av finfraktionen med slaggrus. Då resultaten indikerar att en stabilisering för vissa blandningar verkar ske så skulle detta vara intressant att ta vidare och studera mer för att eventuellt förstå vad som ger denna effekt av dessa var för sig problematiska materialfraktioner. Att undersöka om dessa potentiellt stabiliserande effekter även uppkommer för slaggrus med andra finfraktioner från andra typer av landfill mining projekt vore väldigt intressant.

I Laner et al (2019) som studerar det ekonomiska utfallet för över 500 000 teoretiskt modellerade scenarier av landfill mining så lyfts främst undvikna deponihanteringskostnader, materialförsäljning samt återställd mark eller skapat deponiutrymme som de främsta intäktsposterna. Detta står i kontrast till de flesta studier av olika pilotstudier där oftast endast materialintäkter lyfts som viktigt (Esguerra et al, 2019; Laner et al, 2019).

Denna studie ger stöd till den teoretiska modellen då undvikta kostnader samt skapat deponiutrymme visat sig vara de viktigaste posterna för ett indikerat positivt utfall. En anledning till att skapat deponiutrymme kan ha visat sig vara viktigare i denna studie jämfört med andra är att vi här har kompenserat för att det material som kan deponeras i det skapade deponiutrymmet bedöms ha en mycket högre densitet vilket kombinerat med att deponitaxan betalas per vikt leder till att det kan bli stora intäkter i detta fall.

Det är i många studier svårt att se hur just dessa beräkningar är gjorda (i de fall de överhuvudtaget tagits med) men har de gjorts genom att ersätta vikten uppgrävt material med vikten av det nya deponerade materialet så kan det innebära en mycket mindre summa genererad deponiavgift då densiteten mellan existerande och inkommande avfall i detta projekt skiljer med ungefär en faktor 2.

I detta projekt visar resultaten på en potential till undviken klimatpåverkan vid en storskalig implementering av landfill mining för BCR01. En utgångspunkt för detta är att det funnits en ambition redan från början av att gräva upp material efter avslutad behandling i biocellen. Då kan inte cellen definieras som en slutgiltig förvaring och

därmed kan inte cellen klassas som en kolsänka (cf. Krook et al, 2019). Då följer av vår analys att det inte är bättre att återdeponera bränslefraktionen och skapa ett kollager än att skicka den till förbränning.

Resonemanget visar vidare att om det dessutom skulle gå att tvätta bränslefraktionen och få en utsorterad plastfraktion som kan återvinnas så skulle denna fraktion ge nettopositiv klimateffekt. Nyttan av en återvinningsbar plastfraktion har visats tidigare i en studie av Frändegård et al (2013). Samtidigt brukar mer komplicerade separationskedjor påverka det ekonomiska utfallet negativt (Krook et al, 2019).

Den största positiva klimateffekten med ett storskaligt projekt skulle vara att de stora mängder metanutsläpp som sker under lång tid kan undvikas. Detta ligger i linje med flera andra studier av klimatpåverkan från landfill mining projekt (ibid).

Slutsatser, diskussion om nyttiggörande av resultaten

I projektet, som följer upp det under 2016/2017 genomförda pilotprojektet, har olika sorteringstekniker för urgrävning av avfall från bioceller/biocellreaktorer testats och utvärderats från teknisk, ekonomisk och klimatmässig synpunkt. Försöken, som skett i full skala, visar att en teknik som fungerar för behandling och återvinning av massor från aktuell typ av deponiceller kan baseras på siktning i flera steg.

Jämfört med pilotprojektet har även vindsiktning testats för de större fraktionerna, vilket förbättrar resultatet betydligt, både genom att minska andelen avfall till förbränning, förbättra värmevärden på utsorterat bränsle och minska askhalten i bränslet.

Den finfraktion som siktas fram har i försöken en kvalitet som möjliggör återvinning som konstruktionsmaterial på avfallsanläggningen, t ex i sluttäkningsarbeten. En utmaning är fortfarande att kunna nå en kvalitet som accepteras för fri användning utanför anläggningen. Låg lakbarhet för metaller gör att finfraktionen bör kunna hitta användningsområden efter platsspecifika bedömningar. En begränsning för utnyttjande av finfraktionen är dels att lakningen av lättlösliga salter (klorider, sulfater) är relativt hög och att totalhalterna av vissa metaller kan utgöra ett hinder mot användning av fraktionen i ytliga markkonstruktioner.

En stor fördel med den teknik som utprovats och testats är enkelheten och att nödvändig utrustning, som grävare, hjullastare och trumsiktare normalt redan finns tillgänglig på större avfalls- och återvinningsanläggningar. Specialutrustning som vindsiktare kan hyras in eller förvärvas och utnyttjas även i den dagliga driften på anläggningen, t. ex för sortering av blandat industriavfall (och därigenom sannolikt minska kostnaderna för bränslefraktionen väsentligt).

Modelleringarna av det ekonomiska utfallet för de testade typerna av deponiåtervinning visar tydligt var de viktiga kostnaderna respektive vinsterna finns. Den största enskilda kostnadsposten utgörs paradoxalt nog av mottagningsavgiften för att avsätta utsorterat bränsle, trots att tekniken kan ge bränsle med ett värmevärde över 4 MWh/ton.

Intäktsmässigt utgörs den största vinsten av det utrymme för mottagning av nya massor som skapas, utan att ny mark behöver tas i anspråk. I takt med att allt fler deponier avslutas och sluttäcks bedöms att värdet på tillgängliga deponiresurser kommer att stiga. Redan med dagens kostnads/intäktsbild för deponering av förorenade massor visar

modellberäkningarna att deponiåtervinning kan vara lönsam, även om intäkterna kommer att vara spridda över många år, medan kostnaderna uppstår tidigt.

För att finfraktionen inte ska komma att bli en ekonomisk belastning, genom att tränga undan mottagning av andra massor som ger intäkter i form av mottagningsavgifter, är det viktigt att ytterligare förfinas sorteringstekniken och hitta avsättning för fraktionen utanför anläggningen eller i interna konstruktioner där idag rena massor i vissa fall köps in (t ex skyddsskikt i sluttäckningar).

Försöken bekräftar att ersättning för återvunna material (t. ex. metaller) ekonomiskt kommer att utgöra en mindre viktig del i ett fullskaleprojekt, även om tekniken kan förbättras.

Från klimatsynpunkt finns både för- och nackdelar med deponiåtervinning. Den från klimatsynpunkt största negativa effekten är utsläppen av fossil koldioxid från förbränning av plast som ingår i den lätta fraktionen. Beräkningsmässigt kan den negativa effekten uppvägas av de långsiktigt undvikna utsläppen av metan och likaså undvikna utsläpp från den produktion av el och värme som ersätts med genom användning av utvunnet avfallsbränsle. Hur den sammantagna klimateffekten blir är beroende av de lokala förutsättningarna och förhållandena vid tidpunkten för projektet.

Miljöeffekterna lokalt av urgrävningen/behandlingen har liksom i pilotprojektet varit små/försumbara och bedöms kunna hanteras även vid en fullskalig urgrävning v biocellreaktorerna. De effekter som diskuteras beträffande lokal påverkan är framförallt risken för metanavgång och luktstörningar. Både pilotprojektet och nu genomförd utgrävning och behandling av avfall i större skala visar att den nedbrytning av organiskt material som skett i cellerna kombinerat med effektiv uppsamling av producerad deponigas varit effektiva för att minimera dessa risker.

Resultaten från projektet kommer att kunna utnyttjas praktiskt av NSR för ett fullskaleprojekt. Även för avfallsbranschen i övrigt bedöms att resultaten kommer att kunna nyttiggöras och stimulera till ökat intresse för deponiåtervinningsprojekt. Deponiåtervinning måste dock alltid värderas ”platsspecifikt”,

Vid miljöprövning för etablering av nya deponier skulle möjligheten till deponiåtervinning på befintliga deponier generellt kunna vara en åtgärd att värdera som ett alternativ till att ta ny mark i anspråk. Den klimatnytta som deponiåtervinning skapar värderas idag tyvärr inte på ett sådant sätt att den kommer verksamhetsutövaren till godo, vilket kanske måste ändras för att stimulera deponiåtervinning i större skala.

Genom teknikens enkelhet och möjlig tillämpning på deponier med hög andel organiskt material bedöms att resultaten även bör vara intressanta internationellt.

Utrymmesbrist och utbredning av miljömässigt oacceptabla dump-sites är ett generellt problem i många storstäder i tredje världen, som en direkt effekt av ökad konsumtion och bättre levnadsstandard, men eftersläpande utbyggnad av infrastruktur på avfallsområdet. Ett ”cirkulerande” system med effektiva biocellreaktorer i kombination med deponiåtervinning kan vara ett alternativ till ”dump-sites” eller förbränning av osorterat avfall (som i många länder ofta möter kraftigt motstånd p.g.a. okontrollerade utsläpp till luft och vatten).

Projektkommunikation

Resultat och data från projektet kommer att utnyttjas av medverkande forskare från Linköpings Universitet för publicering av artiklar i vetenskapliga publikationer på temat Landfill Mining. Resultatet kommer även att presenteras på en vetenskaplig konferens.

Inom avfallsbranschen kommer resultaten att spridas via Avfall Sveriges kanaler (bl. a. genom artiklar i tidningen Avfall och Miljö) och den referensgrupp som följt projektet.

Inom ramen för NSR:s FoU-arbete kring Landfill Mining/Deponiåtervinning har under de senaste åren ett flertal examensarbeten genomförts tillsammans med Universiteten i Linköping och Lund.

Referenser, källor

Blasenbauer, D., Bogush, A., Carvalho, M., Cleall, P., Cormio, C., Guglietta, D., Fellner, J., Fernández-Alonso, M., Heuss-Aßbichler, S., Huber, F., Kral, U., Kriipsalu, M., Krook, J., Laner, D., Lederer, J., Lemièrre, B., Liu, G., Mao, R., Mueller, S., Žibret, G. (2020). Knowledge base to facilitate Anthropogenic Resource Assessment.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3739164>

Chandana, N., Goli, V.S.N.S., Mohammad, A., Singh, D.N. (2020). Characterization and Utilization of Landfill-Mined-Soil-Like-Fractions (LFMSF) for Sustainable Development: A Critical Appraisal. Waste and Biomass Valorization.

<https://doi.org/10.1007/s12649-020-01052-y>

Esguerra, J.L., Krook, J., Svensson, N., Passel, S. (2019). Assessing the economic potential of landfill mining: Review and recommendations Volume 08-December 2019, 125–140. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13883>

Frändegård, P., Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2013). A novel approach for environmental evaluation of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 55, 24-34.

Frändegård, P., Krook, J., Svensson, N. (2015). Integrating remediation and resource recovery: On the economic conditions of landfill mining. *Waste Management*, 42, 137-147.

Hernández Parrodi, J.C., Lucas, H., Gigantino, M., Sauve, G., Esguerra, J.L., Einhäupl, P., Vollprecht, D., Pomberger, R., Friedrich, B., Van Acker, K., Krook, J., Svensson, N., Passel, S. (2019). Integration of resource recovery into current waste management through (enhanced) landfill mining. *Detritus* 8, 141–156. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13884>

Johansson, N., Krook, J., & Frändegård, P. (2017). A new dawn for buried garbage? An investigation of the marketability of previously disposed shredder waste. *Waste Management*, 60, 417-427.

Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., (2013) Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 55, 45-55.

- Karlsson, P., Åslund P. (2014) Ekonomiska och miljömässiga förutsättningar för landfill mining, En förstudie av tre olika deponityper vid Filborna-anläggningen i Helsingborg, examensarbete vid Linköpings Universitet.
- Krook, J., Svensson, N., Eklund M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management* 32(3), 513-520.
- Krook, J., Svensson, N., Van Passel, S., Van Acker, K. (2019). Chapter 18 - What do Recent Assessments Tell Us About the Potential and Challenges of Landfill Mining?, Editor(s): Mohammad J. Taherzadeh, Kim Bolton, Jonathan Wong, Ashok Pandey, *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches*, Elsevier, 267-281
- Laner, D., Esguerra, J.L., Krook, J., Horttanainen, M., Kriipsalu, M., Rosendal, R.M., Stanisavljević, N. (2019). Systematic assessment of critical factors for the economic performance of landfill mining in Europe: What drives the economy of landfill mining? *Waste Management* 95, 674–686. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.007>
- Meijer, J-E., Björnsson, L. (2005). Biocell treatment of municipal solid waste, Landfill or Bioreactor?
- Svensson, S., (2017). Tekniska, miljömässiga och ekonomiska förutsättningar för landfill mining, En fallstudie vid NSR:s pilotutgrävning av Biocellreaktor 2001, examensarbete vid Lunds universitet.
- Rönnols, E., Svensson, N., Johansson, N., (2017). Deponiåtervinning, Pilotförsök - urgrävning av biocellreaktor, NSR, Helsingborg. Re-Source slutrapport.
- Vollprecht, D., Hernández Parrodi, J.C., Lucas, H., Pomberger, R. (2020). Case study on Enhanced Landfill Mining at Mont-Saint-Guibert Landfill in Belgium: Mechanical processing, physico-chemical and mineralogical characterisation of fine fractions <4.5 mm. *Detritus* 10, 26–43. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13940>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230.

Bilagor

Bilaga 1. Administrativ bilaga

Bilaga 2. Relationsritningar, urgrävning BCR01, 2018 – 2020

Bilaga 3. Hanteringskostnad, massor från landfill mining, NSR

Bilaga 4. Gasmätning vid landfill mining-projekt på Filborna, oktober 2018, Sweco 2019

Bilaga 5. Resultat av plockanalyser på urgrävt material och bränslefraktioner, NSR och Enivir AB

Bilaga 6. Modellberäkningar, tre praktiska försök med varierande teknik för deponiåtervinning, LiU

Bilaga 7. Indata till modellering, NSR, LiU

Bilaga 8. Öresundskraft, Kvalitetskrav på avfall till förbränning

Bilaga 9. Mätningar av gasflöde från BCR01, 2001–2020

Bilaga 10. Analysresultat, lakvatten, gv-rör i BCR01

Bilaga 11. Analysresultat laktester, utsiktade fraktioner, 2018–2021

Bilaga 12. Analysresultat stabiliseringstest med bottenaska, 2019

Bilaga 13. Analysresultat totalhalter, utsiktade fraktioner 2018–2021,

Bilaga 14. Bränsleanalyser, utsorterade fraktioner, 2018 - 2020