

Kombineret bioforgasning og kompostering af kildesorteret organisk dagrenovation i batch-anlæg

Kasper Kjellberg, Morten Carlsbæk, Jette Lillelund
og Morten Brøgger
Solum A/S

Kaj Henriksen og Tjalfe Poulsen
Aalborg Universitet, Sektion for Miljøteknologi

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

FORORD	5
PROJEKTARTIKEL	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	11
1 INDLEDNING	13
2 ANLÆG OG PROCES	15
2.1 PRINCIPPET I DEN BIOLOGISKE PROCES	15
2.2 AFFALDET	15
2.3 FORBEHANDLING	16
2.4 BIOFORGASNING	16
2.5 KOMPOSTERING	17
2.6 EFTERKOMPOSTERING	18
2.7 SORTERING	18
3 METODER	19
3.1 PRØVETAGNING	19
3.1.1 <i>Kildesorteret organisk dagrenovation</i>	19
3.1.2 <i>Strukturmateriale</i>	19
3.1.3 <i>Råmateriale</i>	19
3.1.4 <i>Udrådnnet biomasse og biogas</i>	20
3.1.5 <i>Frisk kompost</i>	20
3.1.6 <i>Sorteret kompost, plastikfraktion og strukturfraktion</i>	20
3.1.7 <i>Perkolat</i>	21
3.1.8 <i>Komposteringsluft</i>	21
3.2 ENERGI	21
3.2.1 <i>Forbrug</i>	21
3.2.2 <i>Produktion</i>	22
3.3 ANALYTISKE METODER	22
3.3.1 <i>Tørstof og vandindhold</i>	22
3.3.2 <i>Glødetab</i>	22
3.3.3 <i>CHN</i>	22
3.3.4 <i>Total fosfor</i>	22
3.3.5 <i>Mikrobiologiske organismer</i>	22
3.3.6 <i>Biogas</i>	23
3.3.7 <i>Lugt</i>	23
4 RESULTATER OG DISKUSSION	24
4.1 FORUDSÆTNINGER	24
4.2 DRIFTSERFARINGER	24

4.2.1	Forbehandling	25
4.2.2	Proces	25
4.2.3	Hygiejne	25
4.3	MASSEBALANCE FOR PROCESSEN	26
4.4	KVÆLSTOF	29
4.5	FOSFOR	30
4.6	PROCESSENS ENERGIFORBRUG	30
4.7	PROCESSENS ENERGIPRODUKTION	31
4.7.1	Fuldskaladata: Biogas og kompost	31
4.7.2	Scenario 1: Biogas og kompost – potentiale	33
4.7.3	Scenario 2: Biogas og brændsel	34
4.7.4	Summering	35
4.8	LUGT FRIGIVET UNDER KOMPOSTERINGSPROCESSEN	36
5	VURDERING AF ARBEJDSMILJØ	37
5.1	INDRETNING	37
5.1.1	Modtagehal	37
5.1.2	Procesmoduler	38
5.1.3	Lagerplads for kompost	38
5.1.4	Teknikrum	38
5.1.5	Køreveje	38
5.1.6	Personalefaciliteter	38
5.2	DRIFT	38
5.3	PLANLÆGNING, TILRETTELÆGGELSE OG INSTRUKTION AF ARBEJDET	39
5.4	PERSONLIGE VÆRNEMIDLER	39
5.5	RENGØRING	40
5.6	PERSONLIG HYGIEJNE	40
5.7	SYGDOM	40
5.8	UDDANNELSE	40
6	ØKONOMISKE OVERSLAG	41
6.1	ETABLERINGSOMKOSTNINGER	41
6.2	DRIFTSOMKOSTNINGER	42
6.3	ADMINISTRATIONSOMKOSTNINGER	42
6.4	ØVRIGE UDGIFTER	42
6.5	BEHANDLINGSPRIS	43
7	KONKLUSION	44
8	REFERENCER	45
	BILAG A: PROCESSKEMA	47
	BILAG B: BIOGASPRODUKTION	48
	BILAG C: LUGTMÅLING	52
	BILAG D: ENERGI VED FORBRÆNDING	60

Forord

Denne rapport præsenterer resultater opnået i forbindelse med udvikling og etablering af fuldskalaanlæg til bioforgasning og kompostering af fast organisk affald, herunder kildesorteret organisk dagrenovation. Projektet er støttet af Miljøstyrelsen under "Program for renere produkter m.v."

I rapporten præsenteres bl.a. massebalancer for næringsalte og energi baseret på analysedata fra det etablerede fuldskalaanlæg. Da fuldskalaanlægget kun havde været i drift med stabil biogasproduktion i en relativ kort periode på prøvetagningstidspunktet, skal disse diagrammer opfattes som vejledende, da processen på anlægget løbende optimeres. Nyeste information om anlægget kan findes på internetadressen www.solum.dk.

Projektet var et samarbejde mellem Solum A/S og Aalborg Universitet, Sektion for Miljøteknik.

Projektet blev fulgt af en følgegruppe bestående af:

Svend-Erik Jepsen, Miljøstyrelsen
Kaj Henriksen & Tjalfe Poulsen, Aalborg Universitet, Sektion for Miljøteknologi
Torben Jensen, I/S Noveren
Tom Elmer-Christensen, Affaldsteknisk Samarbejde
Niels Remtoft, Kommunernes Landsforening
Allan Kjersgaard, Renosam
Lene Bjerg Kristensen, Miljøkontrollen, Københavns Kommune
Dorthe Hamann, Århus Kommunale Værker.
Caroline Kirkegaard, Affald Danmark
Morten Brøgger & Kasper Kjellberg, Solum A/S

Solum A/S ønsker at takke følgegruppen for et godt samarbejde. Desuden tak til Syddansk Universitet, Biologisk Institut (Henning Jensen), KVL, Institut for Jordbrugsvidenskab (Jakob Magid) for konstruktive ideer i forbindelse med udvikling af proces og kompostprodukter samt Slagteriernes Forskningsinstitut.

December 2004

Morten Brøgger, Projektleder.

Projektartikel

Ny metode til kombineret bioforgasning og kompostering af organisk affald

Det er velkendt at bioforgasning er den behandlingsløsning, der har det største potentiale for udnyttelse af energien i vådorganisk affald, hvorimod kompostering er mere attraktiv i relation til produktion af jordforbedringsmidler. Miljøstyrelsen har med projektet ”Kombineret bioforgasning og kompostering af kildesorteret organisk dagrenovation i batch-anlæg” støttet udviklingen af et behandlingskoncept, der fokuserer på både udnyttelse af energien i affaldet og produktion af kompost. Behandlingsløsningen har på såvel laboratorie-, pilotskala- og fuldskalaniveau vist sig at have et højt energiudbytte samtidig med, at der kan produceres kompost af god kvalitet. Behandlingsløsningen anvender robuste og driftssikre løsninger, som vurderes prismæssigt at være konkurrencedygtig med andre typer af behandling.

Baggrund og formål

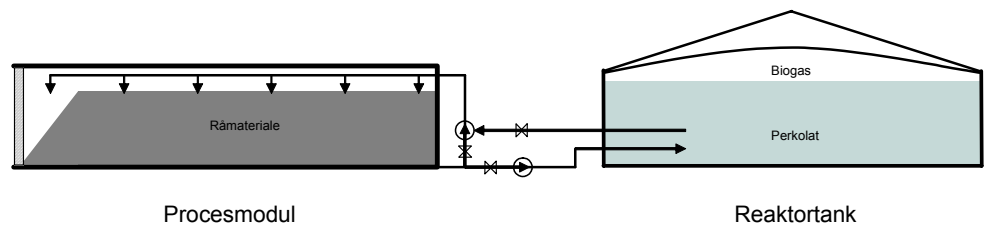
Selv om genanvendelse af kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) er oplagt ud fra et miljømæssigt perspektiv, vanskeliggøres processen af, at affaldet ofte indeholder urenheder i form af f.eks. plastik, glas og metal. Før bioforgasning af KOD er det derfor sædvanligvis nødvendigt, at forbehandle affaldet med henblik på frasortering af ikke biologisk materiale. Forbehandlingen skal sikre, at affaldet ikke forårsager driftsproblemer på anlægget samt, at der opnås en rådnerest, der kan bringes ud på landbrugsjord. Forbehandling af KOD har dog flere ulemper. I miljøøkonomisk perspektiv er forbehandling ofte omkostnings- og energikrævende, hvilket giver et dårligt miljøøkonomisk regnskab. Samtidig produceres en restfraktion, der ikke egner sig til biologisk behandling, selvom den ofte er rig på biologisk materiale. Det forringer udbyttet af kildesorteringen.

I dette projekt fokuseres på udvikling og evaluering af en ny robust behandlingsløsning. Udgangspunktet for teknologien er, at processen skal være så robust, at KOD af normal kvalitet kan behandles uden forudgående frasortering af urenheder. Herved reduceres omkostningerne til forbehandling, og der produceres ikke en restfraktion med et højt indhold af biologisk omsætteligt materiale. Urenheder fjernes først fra komposten efter den biologiske proces, hvorved energien i affaldet udnyttes bedre, da alt organisk materiale gennemgår en biologisk behandling. Samtidig udgør sigteresten en mindre fraktion med et højere tørstofindhold og er derfor mere forbrændingseget.

Undersøgelsen

Den biologiske proces, som blev evalueret i projektet, var en to-faset udrådning efterfulgt af kompostering. Neddelt KOD blandet med strukturmateriale blev overført til en betonbeholder (procesmodul), hvorefter

råmaterialet blev hydrolyseret ved at overrisle med væske under anaerobe forhold. Løbende blev produkterne af hydrolysen, i form af opløst organisk stof i væsken, overført fra procesmodulet til en reaktor, hvor biogassen blev produceret. Efter biogasprocessen blev råmaterialet komposteret i procesmodulet.



Processens biogaspotentiale blev indledningsvist undersøgt på laboratorie- og pilotskalaniveau, mens den samlede proces blev evalueret i et nyopført fuldskalaanlæg.

Hovedkonklusioner

I projektperioden blev det vist, at det er muligt at behandle KOD vha. kombineret bioforgasning og kompostering på det nyetablerede fuldskalaanlæg, samt at behandlingsmetoden er meget stabil. Evaluering af processen resulterede i et netto-energiudbytte på 4241 MJ per ton behandlet KOD med strukturmateriale. Processens nettoenergiudbytte er dermed sammenligneligt med energiudbyttet ved traditionel udrådning i biogasfællesanlæg eller forbrænding direkte på affaldsforbrændingsanlæg. Herudover blev der pr ton produceret 341 kg kompost samt 198 kg strukturmateriale, der kunne genbruges i processen.

Fordelene ved den evaluerede teknologi er, lavere omkostninger til forbehandling af affaldet end ved anvendelse på det traditionelle biogasfællesanlæg, samt lavere anlægsomkostninger end til andre lignende behandlingsanlæg. Herudover er slutproduktet af processen kompost, som er et lagringsstabilt produkt, i stedet for flydende udrådet biomasse fra de konventionelle biogasanlæg.

Fordelene ved biologisk genanvendelse i stedet for forbrænding er; ingen slagge og røggasrensingsprodukter, gødning og organisk stof til plantedyrkning, bevarelse af naturressourcer (fosforindvindingsområder, spagnum-indvindingsområder) samt øget bevidsthed om ressourceforbrug og genbrug.

Ud fra driftserfaringer fra fuldskalaanlægget er det beregnet, at et anlæg projekteret til en årlig kapacitet på 25.000 ton KOD kan drives for en behandlingsudgift på bare ca. 500 kr. per ton KOD, når kapaciteten udnyttes. Den evaluerede teknologi er altså en meget lovende metode til genanvendelse af organisk affald ud fra såvel en miljømæssig som en økonomisk betragtning.

Energi og miljø

I projektperioden fra 1. februar 2003 til 31. december 2004 blev der behandlet ca. 20.000 ton KOD på det nyetablerede fuldskalaanlæg beliggende ved Holbæk. Processens gasudbytte blev evalueret i laboratorie-, pilotskala- og fuldskalaniveau, og resulterede i 74-80 Nm³ metan per ton KOD med strukturmateriale (blandingsforhold: 0,5 ton neddelt grenaffald til 1 ton KOD). For den aktuelle fuldskalaevaluering, resulterede processen i et nettoenergiudbytte på 4241 MJ per ton behandlet KOD med strukturmateriale. Herudover blev der pr ton KOD produceret 341 kg kompost til landbrugsjord og 198 kg strukturmateriale, der kunne genbruges i processen. Af de 6,1 kg kvælstof og 0,93 kg fosfor, der blev tilført processen, blev størstedelen genfundet i kompost- og strukturfraktionerne (hhv. 81 % og 90 %), og kunne således tilbageføres til det biologiske kredsløb.

Energiudbyttet af processen kan forøges væsentligt, hvis produktion af kompost nedprioriteres. Gennem teoretiske scenarier vises således, at det absolut højeste energiudbytte opnås ved at producere biogas og efterfølgende at tørre den ikke-sigtede rådnere rest med henblik på forbrænding i et affaldsforbrændingsanlæg. Denne behandling kan potentielt give et energiudbytte på 8850 MJ for 1 ton KOD og 0,5 ton strukturmateriale.

Arbejds miljø og lugt

Resultaterne af en arbejdsmiljø-evaluering på fuldskalaanlægget præsenteres i rapporten. Det vises, at anlægget fungerer tilfredsstillende. Herudover blev emissionen af lugt fra anlæggets biofilter målt under komposteringsprocessen. Resultatet af undersøgelsen viste et velfungerende biofilter, der gav anledning til en belastning på ca. 5 lugtenheder i en radius på op til 140 m fra filteret, hvilket er acceptabelt for et biologisk behandlingsanlæg.

Økonomi

De økonomiske overslag for anlægsomkostninger, drifts- og administrationsudgifter forbundet med behandlingsløsningen præsenteres. Et anlæg til 25.000 ton KOD per år kræver en investering på 35 mio. kr. (2004). Driftsomkostningerne anslås til 145-210 kr. per ton KOD og administrationsomkostningerne til 80-150 kr. per ton KOD. Anlægget kan hermed drives for en behandlingspris på ca. 500 kr. per ton KOD ved fuld udnyttelse af kapaciteten. Denne pris er konkurrencedygtig med andre behandlingsformer, hvilket pga. den bedre miljøpræstation gør løsningen interessant.

Andre kilder

Christensen, TH; Jansen, JC; Jørgensen, O (2003): Datarapport om sammensætning og biogaspotentiale i organisk dagrenovation. Miljøprojekt, 815.

Christensen, TH; Hansen, TL; Kirkerby, JT; Jansen, JC; Svärd, Å; Toudal, JK; Hulgaard, T; Rasmussen, HW; Gruvberger, C (2003): Basisdokumentation for biogaspotentialet i organisk dagrenovation. Miljøprojekt, 802

Miljøstyrelsen (2003): Statusredegørelse om organisk dagrenovation.
Orientering fra Miljøstyrelsen, 4/2003.

Tønning, K (2003): Erfaringer med indsamling og behandling af bioaffald i
Århus Kommune. Miljøprojekt, 820.

Summary and conclusions

This report presents results from the development, establishment and evaluation of a full-scale plant for anaerobic digestion and composting of solid biodegradable waste, including source-separated biodegradable municipal solid waste (biowaste). The project was carried out by Solum A/S and Aalborg University, Department of Life Science, with support from the Danish Environmental Protection Agency.

The biological process used in the full-scale evaluation was based on a two-phase digestion process, followed by composting. The principle behind the digestion process is to separate the procedure into two phases: a hydrolysis process and a methane-producing process. Hydrolysis was carried out in concrete silos, and the methane was produced in a hermetically-sealed reactor tank, which doubled as a gas storage tank.

To compile mass balances for energy and plant nutrients, samples were taken of the process's raw materials (biowaste and structure material in the form of shredded branches), as well as composted biomass and products from the process (compost, plastic fractions and structure material). In addition, the process's biogas production was evaluated at laboratory, pilot and full-scale levels.

At the full-scale level, the project showed that it is possible to undertake combined anaerobic digestion and composting of biowaste without screening out impurities prior to the biological process. This means that pre-treatment costs are reduced, and the production of waste with a high content of biodegradable matter can be avoided. The products of the biological process are energy, in the form of biogas, and compost.

The laboratory, pilot and full-scale evaluations of gas yield resulted in 70-80 Nm³ of methane per tonne of biowaste with structure material (mix ratio: 0.5 tonne shredded branches to 1 tonne biowaste). For the full-scale evaluation, the process resulted in a net energy yield of 4241 MJ per tonne of treated biowaste with structure material. Additionally, 341 kg compost and 198 kg structure material were produced. The structure material can be reused in the process. Of the 6.1 kg nitrogen and 0.93 kg phosphorous that were added during the process, most was found present in the compost and structure material (81% and 90% respectively), and this could be reintroduced into the biological cycle.

The energy yield from the process can be increased substantially if production of compost is given low priority. Using theoretic scenarios, it has been shown that the absolute highest energy yield can be achieved by producing biogas, then drying the un-screened digestate in order to prepare it for incineration in a waste incineration plant. Potentially, this method can produce an energy yield of 8850 MJ for 1 tonne of biowaste and 0.5 tonne of structure material. However, the advantages of producing compost for agricultural purposes instead of incineration fractions are obvious: no slag or flue gas residues, production of organic fertilizer and organic matter for agriculture,

preservation of natural resources (mining phosphorous ores, peat wetland), as well as a consciousness of resource use and recycling.

The process proved itself to be very robust at the full-scale evaluation level. In the project period (1 February 2003 to 31 December 2004) 14,000 tonnes of biowaste were treated at the plant.

The results from a working-environment (human health and safety) evaluation at the full-scale facility are also presented in the report. Additionally, emissions from the plant's biofilter were measured during the composting process. The result of this showed an efficient biofilter that gave rise to an impact of approximately 5 odour-units in a radius of up to 140 m from the filter.

The estimate for the cost of the plant, as well as running costs and administration expenses associated with the treatment solution, are also presented in the report. The calculations of the estimated cost show that a plant designed for 25,000 tonnes of biowaste yearly requires an investment of DKK 35 million (2004). Running costs are estimated at DKK 145–210 per tonne of biowaste and administration expenses are estimated at DKK 80–150 per tonne of biowaste. It is estimated that a plant projected to treat 25,000 tonnes of biowaste per year can be run at an all-inclusive operating cost of DKK 500 per tonne of biowaste when run at full capacity.

1 Indledning

I forbindelse med udarbejdelse af affaldsstrategier, har der i den seneste tid været stor fokus på miljøøkonomiske analyser som redskab til at sikre "mere miljø for pengene" samt "øget kvalitet i affaldsbehandlingen" (Affaldsstrategi 2005-2008, 2003). Behandling af organisk dagrenovation har således også været genstand for miljøøkonomiske analyser, både nationalt (Miljøstyrelsen, 2003) og internationalt (Hogg et al., 2002). Resultaterne af analyserne varierer dog meget afhængige af, hvilke forudsætninger der lægges til grund for analyserne. Lokale forhold kan ligeledes påvirke resultatet, hvorfor det er vanskeligt på det grundlag at afgøre, hvorvidt en kommune bør indføre indsamling af dagrenovation med efterfølgende bioforgasning/kompostering af den organiske fraktion eller ej.

Selv om der er modstridende resultater omkring det miljøøkonomiske i biologisk behandling af organisk dagrenovation, er bioforgasning den behandlingsløsning der har det største potentiale, hvis energien i affaldet skal udnyttes (Christensen et al., 2003). Derimod er kompostering mere attraktiv i relation til produktion af jordforbedringsmidler og jordblandinger. Kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) indeholder dog ofte urenheder i form af f.eks. plastik, glas og metal, hvilket vanskeliggør den biologiske behandling. Størstedelen af biogasanlæggene i Danmark kræver derfor, at KOD skal forbehandles, med henblik på frasortering af ikke biologisk materiale, før affaldet kan tilføres processen. Forbehandlingen skal sikre, at der ikke tilføres materiale til anlæggene der kan forårsage driftsproblemer samt, at der opnås en rådnerest, der kan bringes ud på landbrugsjord. Forbehandling af KOD har dog flere ulemper set i et miljøøkonomisk perspektiv. Forbehandlingen er omkostnings- og energikrævende. Samtidig produceres en restfraktion, der ikke egner sig til biologisk behandling, selvom den ofte er rig på biologisk materiale (Christensen et al., 2003).

Nærværende projekt fokuserer på udvikling og evaluering af en ny robust teknologi til biologisk behandling af KOD. Udgangspunktet for teknologien er, at processen skal være så robust, at KOD af normal kvalitet kan behandles uden forudgående frasortering af urenheder. Herved reduceres omkostningerne til forbehandling, og der produceres ikke en restfraktion med et højt indhold af biologisk omsætteligt materiale. Desuden fokuseres på udvikling af et koncept hvor både bioforgasning og kompostering er mulig, dvs. at energien i affaldet udnyttes samtidig med at der produceres kompost. Urenheder fjernes fra komposten efter den biologiske proces, hvorved energien i affaldet udnyttes bedre, da alt organisk materiale gennemgår en biologisk behandling. Samtidig vil sigteresten udgøre en mindre fraktion, der har et højere tørstofindhold og derfor er mere forbrændingseget. Det er desuden mindre kompliceret at frasortere urenheder efter komposteringsprocessen, som følge af ændret fysisk struktur og højere tørstofindhold.

Som en del af fuldskalaundersøgelsen blev der etableret et anlæg med en årlig behandlingskapacitet på 5.000 ton KOD på Audebo affaldsdeponi beliggende ca. 10 km nordvest for Holbæk. Anlægget kan efterfølgende udvides til en samlet behandlingskapacitet på 25.000 ton organisk affald (ekskl. 10.000 ton

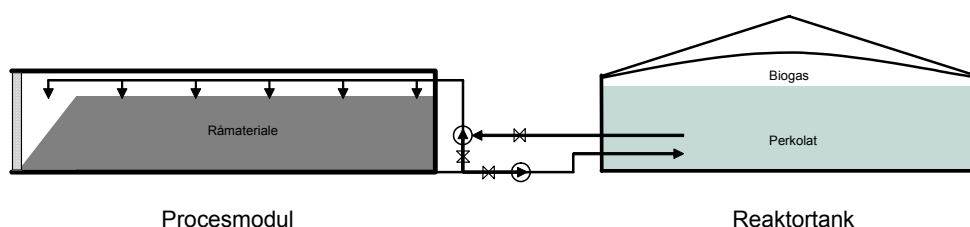
strukturmateriale i form af grenaffald). Evaluering af processen på fuldskalaniveau var prioriteret højt for at opnå realistiske data for processen (Kapitel 4) samtidig med at arbejdsmiljøet kunne evalueres (Kapitel 5). Desuden giver opførelse og drift af fuldskalaanlægget et godt fundament for udarbejdelse af en behandlingspris baseret på anlægs- og driftsudgifter på et stort anlæg med maksimal kapacitet (Kapitel 6).

I fuldskalaundersøgelsen er diagrammer for massebalancer for tørstof, kvælstof, fosfor og energi opstillet på baggrund af de opnåede analysedata. Da fuldskalaanlægget kun havde været i drift med stabil biogasproduktion i få måneder på prøvetagningstidspunktet, skal disse diagrammer opfattes som vejledende, da processen på anlægget løbende optimeres.

2 Anlæg og proces

2.1 Princippet i den biologiske proces

Den biologiske proces, der blev anvendt i fuldskalaevalueringen, var baseret på en to-faset udrådning efterfulgt af kompostering. Princippet bag udrådningprocessen var at separere processen i to faser: en hydrolyserende proces og en metandannende proces. Hydrolysen blev udført i gastætte betonsiloer på 600 m³ (procesmoduler), mens metandannelsen blev udført i en separat gastæt reaktortank (overdækket gyllebeholder på 470 m³) som samtidig fungerede som gaslager (figur 1).



Figur 1: Oversigt over princippet i processen anvendt i fuldskalaevalueringen. Pilene viser transport af perkolat under processen.

I procesmodulet blev råmateriale overrislet med perkolat under anaerobe forhold, hvorefter perkolatet blev opsamlet i bunden af procesmodulet og pumpet tilbage ind over råmateriale. Med mellemrum blev produkterne af hydrolysen (opløst i perkolatet som organiske forbindelser) overført fra procesmodulet til reaktortanken ved at udveksle perkolat mellem procesmodulet og reaktortanken. Efter 6 ugers perkolerings blev råmateriale drænet for perkolatet, og komposteringsprocessen blev startet ved at suge atmosfærisk luft gennem procesmodulet.

Fuldskalaevalueringen blev udført på Audebo affaldsdeponi, Hagesholmvej 7, 4532 Gislinge. Anlægget er ejet af BioVækst A/S.

2.2 Affaldet

I evalueringsperioden (1. januar til 1. juli 2004) blev KOD modtaget fra Noveren's kommuner i Nordvestsjælland (Bjergsted, Holbæk, Kalundborg, Nykøbing-Rørvig, Svinninge, Tornved, Trundholm, og Tølløse Kommune) samt en mindre mængde fra Københavns Kommune. Der blev ugentligt modtaget ca. 50 ton KOD.

Kvaliteten af det kildesorterede affald var meget varierende i projektperioden. En



indledende analyse viste således, at fejlsorteringen (andelen af plastik, glas, metal og bleer) udgjorde 27-35% (af vådvægt) over en 2 måneders periode (september til november 2003). Samtidig viste det sig dog også, at der var stor forskel imellem de enkelte læs; nogle læs var sammenlignelige med almindelig dagrenovation, mens andre var korrekt kildesorteret.

Ved modtagelsen af affaldet blev hvert læs kontrolleret individuelt ved en visuel bedømmelse. Hvis læsset blev vurderet til at have et højt indhold af urenheder (mere end ca. 40% vådvægt metal, glas, plastik og bleer) blev affaldet kasseret. Accepterede læs blev under fuldskalaevalueringen herefter forbehandlet uden forudgående frasortering af urenheder.

Strukturmateriale i form af neddelt grenaffald (grenfraktionen udsorteret fra haveparkaffald) blev anvendt. Strukturmateriale blev leveret neddelt og parat til sammenblanding med det forbehandlede KOD.

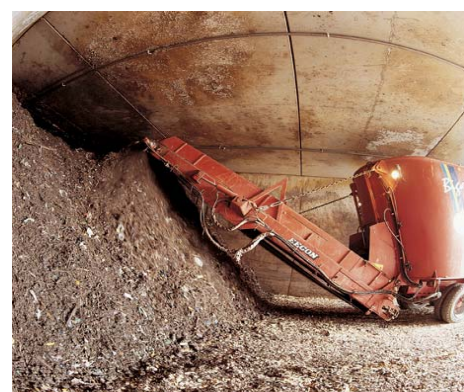
2.3 Forbehandling

Den fysiske struktur af råmateriale har stor betydning for nedbrydningshastigheden. Små partikler med et stort overflade-til-volumen-forhold hydrolyseres langt hurtigere end store partikler, hvorfor neddeling af KOD er afgørende for at opnå en tilfredsstillende omsætning.

Der blev anvendt en blandevoan med lodret stående snegle til at neddele affaldet. Blandevoanen blev betjent af en traktor. De langsomt roterende snegle åbnede poserne og neddelte den organiske fraktion, samtidig med at fejlsorteringer som f.eks. metal, glas, bleer og plastik forblev upåvirket af processen og således ikke knust eller neddelt. Efter neddeling blev der tilsat strukturmateriale i form af neddelt grenaffald til affaldet for at muliggøre dræning og beluftning (1 del grene til 2 dele KOD, vådvægtbasis). Affaldsmassen (råmateriale) blev herefter blandet godt sammen i blandevoanen, hvorefter det blev overført til procesmodulet via et transportbånd monteret bag på voanen.

2.4 Bioforgasning

I forbindelse med evalueringen blev KOD opsamlet over en periode på 5 uger for at opnå tilstrækkeligt med råmateriale til at fylde og igangsætte et procesmodulet i en arbejdsang. Procesmodulet bestod af en plansilo med



tagkonstruktion i beton (21,5 m lang, 7,0 m bred og 4,0 m høj). Råmaterialet blev aflæst i siloen i en højde af ca. 3 m. Herefter blev procesmodulet lukket med en tætsluttende isoleret port, hvorefter udrådningsprocessen kunne påbegyndes.

Udrådningsprocessen blev initieret ved at overrisle råmaterialet med perkolat fra reaktortanken opvarmet til 35°C via et sprinklersystem monteret i taget af procesmodulet. Perkolatet blev herefter opsamlet i kanaler i gulvet af modulet, hvorefter det blev opvarmet og recirkuleret til procesmodulet. Løbende blev produkterne fra hydrolysen overført fra procesmodulet til reaktortanken ved at udveksle perkolat mellem procesmodulet og reaktortanken.



Reaktortanken bestod af en isoleret gylletank med en diameter på 12,8 m og en højde på 3,9 m. Gylletanken var overdækket med en indre elastisk membran som kunne udvide sig i takt med produktionen af biogas. Udover den indre membran var der monteret en ydre fast membran som klimaskærm. Indholdet i reaktortanken var opvarmet til 35°C og omrøring blev udført ved ind- og udpumpning af væske i tanken (indtag i kanten, udpumpning fra centrum).



Mesofilt udrådnat svinegylle fra et gårdbiogasanlæg blev benyttet som podemateriale ved start af processen. Biogas produceret i reaktortanken blev anvendt i en eksisterende gasmotor på området, som var installeret til afbrænding af deponigas. Motoren producerede elektricitet til nettet, mens varmen blev udnyttet i biogas- og komposteringsprocessen og til opvarmning af de omkringliggende bygninger.

Efter 6 ugers perkolerung med hydrolyse i procesmodulet efterfulgt af biogasproduktion i reaktortanken, blev processen afsluttet og komposteringsprocessen påbegyndt.

2.5 Kompostering

Komposteringsprocessen blev udført i procesmodulet ved at tvangsbelufte råmaterialet med sug gennem kanaler i gulvet i 3 uger, hvorefter afgangslugten blev ledt til biofilter. Atmosfærisk luft blev ledt ind i procesmodulet gennem en taghætte med elektronisk styret spjæld. Princippet i komposteringsprocessen byggede på en periodevis beluftning af råmaterialet, således at der blev opnået en procestemperatur (dvs. temperaturen på luften som blev suget ud af modulet) på 55-60°C. Under komposteringsprocessen blev råmaterialet med mellemrum vandet med perkolat gennem sprinklersystemet og overskydende perkolat blev opsamlet i kanalerne i gulvet og ledt til reaktortanken for at blive udrådnat.

Under komposteringsprocessen blev indholdet i procesmodulet hygiejniseret ved, at stoppe beluftsprocessen således at varmen i råmaterialet kunne fordele sig. Som et led i hygiejniseringsprocessen, blev der vandet perkolat opvarmet til 75°C ind over komposten. Under denne proces blev perkolatet løbende opsamlet i kanalerne og genopvarmet til 75°C før det blev recirkuleret til procesmodulet.

Efter hygiejniseringsprocessen blev komposten tvangsbeluftet kontinuerligt med atmosfærisk luft i 7 dage for at opnå udtørring og afkøling før tømning af procesmodulet. Komposten blev kørt ud af procesmodulet med gummiged til efterkompostering.

2.6 Efterkompostering

Umiddelbart efter tømning af procesmodulet, blev råkomposten eftermodnet i miler i 3 måneder for at opnå yderligere stabilisering. Eftermodningsprocessen resulterer samtidig i et mere tørt produkt, der er lettere at sortere samt en sigterest med et højere tørstofindhold, der er forbrændingsegnet. Under efterkomposteringsprocessen blev milerne vendt med gummiged en gang per måned.

2.7 Sortering

Komposten blev sorteret over 10 mm rundsorterer. Fraktionen 0-10 mm udgjorde den færdige afsætningsklare kompost, mens fraktionen 10-40 mm, hvorfra metal blev fjernet med magnetseparator og plastik med vindsigte, bestod af strukturmateriale, der kunne genbruges i processen. Fraktionen >40 mm bestod primært af ikke-biologisk materiale, som blev ført til forbrændingsanlæg sammen med plastikfraktionen fra vindsigten.



3 Metoder

Kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) blev i perioden fra 1. januar til 5. februar 2004 indsamlet for at have tilstrækkeligt med materiale til at fylde et procesmodul. Ud fra analysedata af KOD og strukturmateriale blev sammensætningen af råmaterialet tilført procesmodulet beregnet (Bilag A). Herudover blev der udtaget 5 samleprøver i forbindelse med tømning af procesmodulet, ligesom der blev udtaget samleprøver efter sortering af den færdige kompost (plastikfraktion, strukturfraktion og kompost). Mængde af produceret biogas samt indholdet af CH_4 og CO_2 blev løbende målt under biogasprocessen (6. februar til 19. marts, 2004), således at det var muligt at beregne massebalancen for tørstof, kvælstof og fosfor igennem anlægget (Bilag A).

For at kvantificere mængden af materiale, som ikke var biologiske omsætteligt, blev KOD analyseret for indhold af fejlsorteret materiale (plastik, metal, glas og bleer).

3.1 Prøvetagning

3.1.1 Kildesorteret organisk dagrenovation

For at få et repræsentativt billede af råmaterialets sammensætning blev samleprøver af KOD indsamlet en gang hver uge i løbet af de 5 uger materialet blev tilført anlægget (dvs. der blev udtaget 5 samleprøver af hhv. KOD og strukturmateriale). En samleprøve bestod af 12 delprøver á ca. 500 kg indsamlet fra 12 vilkårlige steder i bunken (i alt ca. 6.000 kg) som blev overført til blandevognen. I blandevognen blev poserne åbnet og affaldet neddelt. Efter neddeling blev en repræsentativ prøve på ca. 100 l udtaget, som efterfølgende blev udlagt på betongulv, og fejlsorteringer i form af plastik, glas, metal og bleer blev identificeret og vejjet separat. Den biologiske fraktion fra 100 l prøven blev neddelt i kompostkværn og vejjet. Fra den biologiske fraktion blev der udtaget en samleprøve på ca. 1 kg som blev yderligere neddelt i kødhakker og frosset (-18°C) til senere bestemmelse af tørstof og glødetab samt det totale indhold af C, N og P. Ligeledes blev 100 g udtaget til analyse af mikrobiologiske parametre.

3.1.2 Strukturmateriale

Strukturmateriale bestod af neddelt grenaffald. Strukturmateriale blev leveret neddelt og parat til sammenblanding med det forbehandlede KOD. Samme procedure som beskrevet for KOD blev anvendt til indsamling og homogenisering af prøverne. Strukturmateriale blev analyseret for de samme parametre som beskrevet for KOD.

3.1.3 Råmateriale

Råmaterialets sammensætning blev beregnet ud fra blandingsforholdet mellem KOD og strukturmateriale (2:1 på vådvægtsbasis) og analysedata af KOD og

strukturmateriale. Vægten af råmaterialet blev registreret før det blev overført til procesmodulet.

3.1.4 Udrådnet biomasse og biogas

Det var ikke muligt at udtage prøver af udrådnet biomasse, da tømning af procesmodulet først blev udført efter komposteringsprocessen. Sammensætningen af udrådnet biomasse blev derfor beregnet ud fra analysedata af råmaterialet samt biogassen (Bilag A).

Mængden af produceret biogas blev løbende registreret vha. flowmåler installeret på gasledningen umiddelbart efter reaktortanken. Prøver af gassen blev udtaget 3 gange per uge til analyse for CH_4 og CO_2 . Mængden af vand fraført med biogassen, blev beregnet ud fra temperaturen i reaktortanken under antagelse af, at biogassen var 100 % mættet med vanddamp.

Indledende forsøg viste, at flowmåleren var ustabil i drift pga. højt vandindhold i gassen. Gasproduktionen blev derfor sideløbende bestemt ved at måle gaspotentialet af perkolat tilført reaktortanken fra procesmodulet i laboratorieforsøg (Bilag B). Ud fra daglige registreringer af gaspotentiale og volumen af tilført perkolat til reaktortanke, kunne gasproduktionen dermed estimeres.

Herudover blev processens evne til at producere gas evalueret i såvel laboratorieopstillinger som i pilotskalaforsøg, for at opnå et solidt grundlag for at fastlægge processens gasudbytte (Bilag B).

3.1.5 Frisk kompost

Efter 3 ugers kompostering i procesmodulerne (20. marts til 9. april, 2004), blev procesmodulet tømt med gummiged og vejjet. I den forbindelse blev i alt 5 samleprøver udtaget i 5 forskellige tværsnit af biomassen. Hver samleprøve bestod af ca. 20 delprøver á 5 l udtaget i et tværsnit af biomassen (dvs. prøver fra overfladen, centrum og bunden var ligeligt repræsenteret). Frasortering af urenheder og homogenisering af prøverne blev udført efter samme procedure som beskrevet for KOD. Herefter blev den biologiske del af affaldsfraktionen (materialet frasorteret urenheder) analyseret som beskrevet for KOD.

3.1.6 Sorteret kompost, plastikfraktion og strukturfraktion

Efter en eftermodningsperiode på 3 måneder blev komposten sorteret over 40 mm og 10 mm rundersorterer. Fraktionen 0-10 mm udgjorde den færdige afsætningsklare kompost. Metal blev fjernet fra 10-40 mm fraktionen med magnetseparator og plastik med vindsigte. Herefter bestod 10-40 mm fraktionen primært af strukturmateriale og kunne genbruges i processen. Fraktionen >40 mm plus vindsigtens plastikfraktion bestod hovedsageligt af ikke-biologisk materiale og blev afsat til forbrændingsanlæg.

Den stabiliserede kompost blev således opdelt i tre fraktioner, som blev vejjet individuelt: 0-10 mm kompost, 10-40 mm struktur og >40 mm plastik + vindsigtens plastikfraktion.

Fra både kompost-, struktur- og plastikfraktionen blev der udtaget 5 samleprøver repræsenteret ved ca. 20 delprøver á 5 L. Frasortering af urenheder og homogenisering af prøverne blev udført efter samme procedure som beskrevet for KOD, og samme analyser som beskrevet for KOD blev udført på den biologiske fraktion.

3.1.7 Perkolat

Mængden af perkolat og koncentrationerne af total C, N og P i perkolatet blev analyseret ved start af bioforgasning i procesmodulet og efter afslutning af komposteringen i procesmodulet.

3.1.8 Komposteringsluft

Lugt i afkastluften fra komposteringen i procesmodulet blev analyseret efter biofiltret ved opstart af komposteringsprocessen. Prøverne blev analyseret vha. olfaktometri. Tabet af kvælstof under komposteringsprocessen blev vurderet ud fra forskellen mellem analyser af produkterne (kompost, plastikfraktion og strukturmateriale, samt biofiltermaterialet) og den friske kompost (Bilag A). Akkumulering af kvælstof i biofilteret blev vurderet ud fra prøver af biofilteret før og efter processen.

3.2 Energi

3.2.1 Forbrug

Forbrug af energi i forbindelse med håndteringen af affaldet blev kvantificeret for hver enkel delproces (dieselolie, elektricitet og varme, Tabel 1).

Tabel 1: Energiforbrug i form af diesel til maskiner, elektricitet til drift af anlæg og fyringsolie til opvarmning der blev kvantificeret.

Proces	Maskiner (Diesel)	Elektricitet (kWh)	Varme (Olie)
Forbehandling og opfyldning af procesmodul	X		
Biogasproces		X	X
Komposteringsproces		X	X
Tømning af procesmodul	X		
Efterkompostering	X		
Sortering	X		

Maskinernes (traktor, sorteringsanlæg og læsemaskine) forbrug af diesel blev registreret for hver enkelt proces, ligesom forbruget af elektricitet blev aflæst på måler før og efter biogasprocessen (primært drift af pumper) og komposteringsprocessen (primært drift af ventilator). Varmeforbruget blev målt som forbrugt olie i tilsluttet oliefyr. Denne metode blev foretrukket, frem for at få varmen leveret fra gasmotoren i evalueringsperioden, da det ikke var muligt at opgøre varmförbruget relateret til selve processen separat fra varmförbruget relateret til opvarmning af omkringliggende bygninger. Varmeförbruget blev opgört over en periode med en gennemsnitstemperatur på 6,5°C.

Det samlede forbrug af energi blev opgört i primärenergi målt som megajoule (MJ).

3.2.2 Produktion

Det producerede biogas blev anvendt i en gasmotor installeret på området til afbrænding af deponigas. Motoren producerede elektricitet til nettet, mens varmen blev udnyttet i processen (dog ikke i evalueringsperioden, hvor varme blev leveret fra oliefyr) og til opvarmning af omkringliggende bygninger. I energiberegningerne blev det antaget, at biogas blev udnyttet i en nyinstalleret moderne gasmotor. Energivirkningsgraden ved forbrænding af biogas i en ny gasmotor er typisk mellem 80 - 92% af indfyret (elvirkningsgrad 38% og varmekvirkningsgrad 40 - 54% af indfyret). Udslip af uforbrændt hydrocarbon inklusiv metan er < 150 mg per Nm³ udstødningsgas. I energiberegningerne blev der anvendt en motor med en energivirkningsgrad på 90% af indfyret (elvirkningsgrad 38% og varmekvirkningsgrad 52% af indfyret).

Energiproduktion i forbindelse med forbrænding af plastikfraktion blev antaget udført på affaldsforbrændingsanlæg med en energivirkningsgrad på 85% af indfyret (elvirkningsgrad 22% og varmekvirkningsgrad 63% af indfyret). Energiproduktionen blev beregnet ud fra tørstofindholdet af det afbrændte affald samt brændværdien af tørstoffet. For detaljeret gennemgang af beregningsmetode henvises til Christensen et al. (2003).

3.3 Analytiske metoder

3.3.1 Tørstof og vandindhold

Tørvægten blev bestemt ved tørring af ca. 100 g samleprøve til konstant vægt ved 105°C (CEN EN 13040, 1999).

3.3.2 Glødetab

Organisk materiale blev bestemt ved at forbrænde 10 g tørret neddelte masse til konstant vægt ved 450°C (CEN EN 13039, 1999).

3.3.3 CHN

10 g af den tørrede prøve blev neddelte i morter og en repræsentativ prøve på ca. 300 mg blev analyseret på en Carbo Erla CHN-analyser.

3.3.4 Total fosfor

Total fosfor blev ekstraheret fra den forbrændte prøve med 1 M HCl (kogning i 1 time) hvorefter fosfat koncentrationen blev kvantificeret som molybdat reaktivt fosfor (DS 292, 1985).

3.3.5 Mikrobiologiske organismer

Prøver blev opbevaret i polyethylen poser i køleboks (< 5°C) og analyse blev påbegyndt indenfor 48 timer efter at prøverne var udtaget. Ca. 10 g af prøven blev udtaget og forbehandlet i henhold til NMKL No. 91 (1988). Antallet af *E. coli* og *Enterococci* i den forbehandlede prøve blev bestemt efter hhv.

NMKL No. 125 (1996) og NMKL No. 68 (1992). *Salmonella* spp. blev bestemt kvalitativt i henhold til NMKL No. 71 (1991).

3.3.6 Biogas

Prøver af biogas (4,5 mL) blev udtaget med engangssprøjte og overført til 4 ml evakuerede venojects. Biogasprøver blev opbevaret ved 5°C indtil analyse for metan og CO₂ på Chrompack Packard CP 9002 gaskromatograf udstyret med TDC detekter.

3.3.7 Lugt

Biofiltrets effektivitet blev bestemt ved at udtage 3 prøver af afgangsluften, som blev analyseret ved olfaktometri. Herefter blev spredningsberegninger udført med OML. Olfaktometri blev valgt som den mest direkte måde at kvantificerer lugt og relaterer denne til gener (Bilag C). Evaluering af biofiltrets lugtemission blev udført af Slagteriernes Forskningsinstitut.

4 Resultater og diskussion

4.1 Forudsætninger

Resultatet af en biologisk fuldskalaevaluering vil altid være meget følsom og yderst påvirkelig af de prioriteringer, der foretages på anlægget. Driften kan således optimeres med udgangspunkt i en række forskellige variable. Af afgørende prioriteringer kan nævnes optimering mht. opnåelse af:

- Billigste affaldsbehandlingsløsning.
- Største energiudbytte.
- Største recirkulering af næringsalte til landbrugsjord.
- Største produktion af kvalitetskompost til jordforbedring.

Optimering af en variabel, vil i langt de fleste tilfælde påvirke de øvrige i mere eller mindre grad. Før der træffes en afgørelse om valg af proces, er det derfor af afgørende betydning, at forudsætningerne for valg af proces er klarlagt.

For den aktuelle fuldskalaevaluering er der gjort følgende betragtninger:

Økonomi: Det prioriteres at behandlingsomkostningerne på længere sigt skal være konkurrencedygtige med alternative behandlingsløsninger såsom forbrænding. Processen projekteres med udgangspunkt i, at der kan opnås en behandlingspris på ca. 500 kr. per ton KOD ved fuld udnyttelse af anlæggets fuldt udbyggede kapacitet (Kapitel 5).

Energi: Produktion af energi i form af biogas prioriteres, således at energiudbyttet ved processen som minimum er sammenligneligt med forbrænding. Energiudbyttet kan dog prioriteres højere ved optimering på produktion af faste brændselsfraktioner (fx plastikfraktion). Dette er dog ikke prioriteret i den aktuelle evaluering, men der er opstillet scenarier, der viser potentialet. Produktion af faste forbrændingsfraktioner vil dog påvirke produktionen af kompost og recirkulering af næringsalte negativt, til fordel for produktion af forbrændingslagger.

Næringsalte: Recirkulering af næringsalte er prioriteret, dog med udgangspunkt i, at gødningsproduktet skal være lagringsstabilt og frigive minimal lugt. Et lagringsstabilt kompostprodukt vil have et lavere kvælstofindhold sammenlignet med udrådnet biomasse.

Kompost: Produktion af kvalitetskompost til jordforbedring er højt prioriteret. Kvalitetskompost giver fleksible afsætningsmuligheder samt gode lagringsegenskaber.

4.2 Driftserfaringer

I perioden 1. februar 2003 til 31. december 2004 blev der modtaget og behandlet ca. 20.000 ton KOD på BioVækst's anlæg ved Audebo. Der er

således et solidt fundament til at vurdere driften på anlægget samt arbejdsmiljøet (Kapitel 4).

4.2.1 Forbehandling

Blandevognen, der blev anvendt til at åbne poser og neddele affaldet, har i evalueringsperioden ikke haft driftsafbrydelser udover almindelig service. Blandevognen blev drevet af en traktor, der udover forskrevne service heller ikke har driftsafbrydelser. Der er således tale om meget robust udstyr, der sikrer stor driftsstabilitet. I tilfælde af evt. tekniske problemer vil det desuden være muligt at leje erstatningsudstyr med dags varsel.

Den robuste og simple teknologi sikrer, at affald modtaget på anlægget altid kan forbehandles og overføres til procesmodulerne.

4.2.2 Proces

Udgangspunktet for designet af anlægget var, at opnå størst mulig driftsfleksibilitet igennem hele anlægget, således at der altid er en biologisk behandlingsløsning tilgængelig på anlægget. Samtidig skulle både bioforgasning og kompostering være muligt, hvorved netop den biologiske proces kan vælges (eller kombination af biologiske processer), som bidrager til optimal udnyttelse af affaldets ressourcer. Opdeling af biogasprocessen i to faser medfører desuden, at affaldet ikke skal transporteres under den biologiske proces. Herved undgås dyre og højteknologiske løsninger til forbehandling af affaldet som samtidig ofte resulterer i et reject med et højt indhold af biologisk materiale (Christensen et al., 2003).

På anlægget er alle procesmoduler parallelt forbundet, således at processen i ét modul kan styres uafhængigt af procesvalg i øvrige moduler. Alt teknisk udstyr, herunder håndtering af perkolat og ventilation, er kun tilknyttet ét procesmodul, så ingen procesmoduler deler teknisk udstyr (f.eks. pumper, ventilatorer og opvarmning). Hygiejniseringsprocessen kan ligeledes udføres individuelt afhængigt af hvilke (evt. kommende) krav, der stilles til et specifikt råmateriale. I teorien er der derfor lige så mange forskellige behandlingslinier til rådighed på anlægget, som der er procesmoduler. Servicering af et procesmodul vil samtidig ikke påvirke driften af det øvrige anlæg.

Den store fleksibilitet i behandlingsproces har resulteret i, at der i projektperioden altid har været kapacitet til at behandle biologisk affald. Dette må betegnes som en succes for et fuldskalaanlæg under udbygning til maksimal kapacitet og indkøring.

4.2.3 Hygiejne

Tre samleprøver af hhv. råmateriale, frisk kompost (udtaget i forbindelse med tømning af procesmodulet) og sorteret stabiliseret kompost blev analyseret for *Salmonella*, *Enterococcus* samt *E. coli* (Tabel 2).

Tabel 2. Koncentrationen af *E. coli*, *Enterococcer* og *Salmonella* i 3 samleprøver analyseret af hhv. råmateriale, frisk kompost og sorteret kompost.

	<i>E. coli</i> (antal per gram vådvægt) Prøve nr.			<i>Enterococcer</i> (antal per gram vådvægt) Prøve nr.			<i>Salmonella</i> (+/- i 25 gram vådvægt) Prøve nr.		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Råmateriale	1,2*10 ⁵	8,8*10 ⁴	8,3*10 ⁴	6,4*10 ⁵	5,8*10 ⁵	3,9*10 ⁵	+	+	-
Frisk kompost	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-	-	-
Sorteret kompost	<10	<10	<10	IM	IM	IM	-	-	-

IM = Ikke målt

Koncentrationen af *E. coli* var i råmaterialet mellem 8,3*10⁴ og 1,2*10⁵ per g vådvægt mens koncentrationen af *Enterococcer* var mellem 3,9*10⁵ og 6,4*10⁵ per g vådvægt. *Salmonella* var repræsenteret i 2 ud af de 3 samleprøver (25 gram) analyseret af råmaterialet.

For den friske hygiejniserede kompost var koncentrationen af *Enterococcer* og *E. coli* < 10 per g vådvægt som udtryk for en tilfredsstillende hygiejniseringsproces (Christensen et al., 2002a) og tilstedeværelse af *Salmonella* kunne ikke påvises i de analyserede prøver.

Den færdige kompost efter 3 måneders efterkompostering i miler havde et lavt indhold af *E. coli* hvilket er typisk for en stabil kompost. *Salmonella* var ikke repræsenteret i den færdige kompost, hvilket er udtryk for tilfredsstillende drift af anlægget – dvs uden rekontaminering af slutproduktet (Christensen et al., 2001; 2002a; 2002b).

4.3 Massebalance for processen

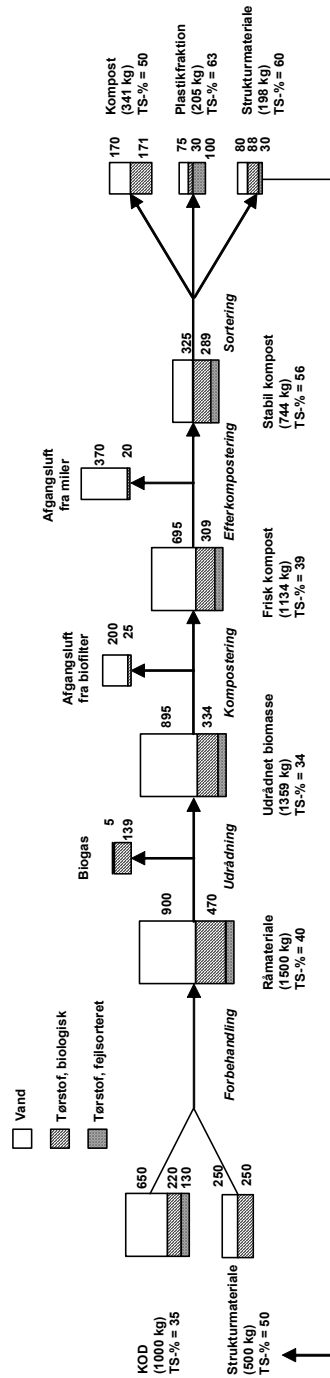
Massebalancen er beregnet med udgangspunkt i data indhentet fra den aktuelle driftssituation (se Bilag A). En massebalance baseret på få måneders drift skal betragtes som vejledende, fordi massebalancer altid er stærkt påvirkede af driftssituationen og de i perioden truffede valg. Således kan mængden af produceret kompost forøges ved at anvende en længere opholdstid i sorterværket, hvilket også vil medføre en reduceret plastikfraktion og strukturmateriale-fraktion. En ændret indstilling af vindsigtens effekt ville medføre en større plastfraktion og en reduceret mængde strukturmateriale.

I evalueringsperioden indeholdt KOD på vådvægtsbasis 67±4% biologisk materiale mens de resterende 38±4% bestod af urenheder i form af plastik, glas, metal og bleer (Figur 2). På tørvægtsbasis udgjorde indholdet af urenheder dog kun 13±1% mens den biologiske fraktion repræsenterede 22±1%.

Strukturmaterialet (neddelt grenaffald) havde et tørstofindhold på 50±5%. Til 1 ton KOD blev der tilsat 0,5 ton strukturmateriale. Strukturmaterialet bidrog således væsentligt til råmaterialets tørstofindhold.

Under biogasprocessen blev der produceret 117 Nm³ biogas (per ton KOD tilført anlægget) med et metanindhold på 63% (volumen) og et CO₂ indhold på 37% svarende til, at der blev produceret 139 kg gas per ton KOD tilført anlægget (Bilag B). En mindre mængde vanddamp på 5 kg per ton KOD blev udskilt fra biogassen.

Under komposteringsprocessen i procesmodulerne blev der frigivet 200 kg vand og 25 kg tørstof, mens efterkomposteringsprocessen i miler resulterede i en frigivelse af yderligere 390 kg vand og 20 kg tørstof.



Figur 2: Massebalance vand og tørstof repræsenteret i biologisk og ikke-biologisk materiale i behandlingsprocessen. Bemærk at den præsenterede massebalance er baseret på driftsdata fra den aktuelle fuldskalævaluering. Massebalancen skal betragtes som vejledende, da en ændret driftssituation kan påvirke massebalancen betydeligt. I den aktuelle driftssituation, blev produktion af kvalitetskompost prioriteret højt.

Sortering af den stabile kompost efter 3 måneders eftermodning i miler resulterede i 341 kg kompost, 205 kg plastikfraktion samt 198 kg strukturmateriale.

Den færdige, stabile kompost havde et tørstof-indhold på $50\pm 5\%$. Synlige urenheder i komposten (plastikstykker og glasskår) udgjorde $0,12\pm 0,05\%$ på vådvægtsbasis svarende til, at 0,34 kg tørstof af de 130 kg, der var tilstede i råmaterialet (0,26%), var repræsenteret i komposten.

Plastikfraktionen udgjorde 205 kg og havde et tørstof-indhold på $63\pm 2\%$. Biologisk materiale, primært i form af større træstykker, udgjorde 30 kg tørstof af de samlede 130 kg tørstof repræsenteret i plastikfraktionen.

Strukturfraktionen havde et tørstof-indhold på $60\pm 3\%$. Urenheder udgjorde 30 kg tørstof, primært i form af tungere plastikstykker og glas, der kunne passere 40 mm soldet (fx tandpastatuber). Herudover var der 88 kg biologisk tørstof i form af flis (10-40 mm).

I starten af biogasprocessen faldt volumen af perkolatet i reaktortanken, men det steg igen efter få dage således, at der ikke var forskel i volumen før og efter den biologiske proces i procesmodulerne. Der blev således ikke observeret akkumulering eller reduktion i perkolat under processen.

4.4 Kvælstof

I Tabel 3 er massebalancen for kvælstof (N) i den biologiske fraktion angivet for 1 ton behandlet KOD (N repræsenteret i ikke-biologisk materiale er ikke inkluderet).

Tabel 3. Massebalance for kvælstof for 1 ton behandlet KOD (kun biologisk fraktion).

	Tørstof (kg)	N-indhold (% af tørstof)	N (kg)	N-fordeling (%)
Tilført proces:				
KOD	220	2,4	5,3	88
Struktur	250	0,3	0,8	12
I alt	470	2,7	6,1	100
Produkter:				
Kompost	171	2,6	4,5	74
Plastikfraktion	30	0,7	0,2	4
Strukturfraktion	88	0,5	0,4	7
Biofilter	---	---	0,5	8
Afdampning (beregnet)	---	---	0,4	7
I alt:	289	3,8	6,0	100

Den biologiske del af KOD indeholdt 5,3 kg N per ton KOD og udgjorde 88% af biologisk N tilført processen. Strukturmateriale bidrog med 0,8 kg N per ton behandlet KOD.

Størstedelen af kvælstof tilført processen endte i komposten (74%) og kan dermed umiddelbart tilbageføres til det biologiske kredsløb. Herudover var 7% bundet i strukturfraktion som tilbageføres til processen og 8% blev bundet i biofilteret. Kvælstof bundet i biofilteret kan tilbageføres til det biologiske kredsløb ved at udskifte filteret med jævne mellemrum og anvende filtermateriale i jordprodukter.

Fra systemet blev 4% af N tilført anlægget tabt gennem forbrænding af plastikfraktionen og 7% blev frigivet under komposteringsprocessen (beregnet ud fra differencen mellem N tilført processen og N repræsenteret i produkter). Dette lave kvælstoftab under kompostering skyldes med andre ord, at afkastluften fra første del af komposteringen blev ført gennem et biofilter.

4.5 Fosfor

I Tabel 4 er massebalancen for fosfor (P) i den biologiske fraktion angivet for 1 ton behandlet KOD (P repræsenteret i ikke-biologisk materiale er ikke inkluderet).

Tabel 4. Massebalance for fosfor for 1 ton behandlet KOD (kun biologisk fraktion).

	Tørstof (kg)	P-indhold (% af tørstof)	P (kg)	P-fordeling (%)
Tilført proces:				
KOD	220	0,40	0,88	95
Struktur	250	0,02	0,05	5
I alt	470	0,42	0,93	100
Produkter:				
Kompost	171	0,32	0,55	64
Plastikfraktion	30	0,28	0,08	10
Strukturfraktion	88	0,25	0,22	26
I alt:	289	0,85	0,85	100

Den biologiske del af KOD indeholdt 0,88 kg P per ton KOD og udgjorde dermed 95% af biologisk P tilført processen, mens strukturmaterialet bidrog med 5%.

Af de 100% P, der blev tilført processen, blev 91% genfundet i produkterne.

Størstedelen af P tilført processen endte i komposten (64%) og kan dermed umiddelbart tilbageføres til det biologiske kredsløb. Herudover var 26% bundet i strukturfraktion, som kan genanvendes i processen.

Fra det biologiske kredsløb blev 10% af P tilført anlægget tabt gennem forbrænding af plastikfraktionen.

4.6 Processens energiforbrug

I Tabel 5 er opgivet en oversigt over processens energiforbrug.

Tabel 5: Oversigt over energiforbrug forbundet med behandling af 1 ton KOD relateret til de enkelte delprocesser.

Proces	Maskiner (Olie, L)	Elektricitet (kWh)	Varme (Olie, L)	Primærenergi (MJ)
Forbehandling og opfyldning af procesmodul	0,9			32
Biogasproces		5	2,9	122
Komposteringsproces		1	1,7	65
Tømning af procesmodul	0,4			14
Efterkompostering	0,4			14
Sortering	0,3			11
I alt	2,0	6	4,6	258

Størstedelen af processens energiforbrug (64%) blev brugt til opvarmning af reaktortank under biogasprocessen samt til hygiejnisering under komposteringsprocessen. Drift af maskiner i forbindelse med nedknusning af grenaffald, forbehandling, opfyldning og tømning af procesmodul, vending af miler samt sortering udgjorde 28% af processens energiforbrug i form af dieselolie. Kun 8% af processens energiforbrug blev brugt i form af elektricitet til drift af pumper og ventilatorer.

4.7 Processens energiproduktion

Baggrunden for det udviklede behandlingskoncept var et ønske om at kombinere produktionen af biogas og kompost vha. robuste, simple og driftsikre løsninger. Produkterne af processen er således energi i form af biogas samt jordforbedringsmiddel/organisk gødning i form af kompost. Herudover indeholder KOD fejlsorteret materiale som primært udgøres af fejlsorteret materiale. Denne fraktion er velegnet som brændsel i forbrændingsanlæg som følge af et højt tørstofindhold.

I et energiregnskab kan det være svært at fastsætte værdien af kompost. Umiddelbart substituerer næringsstofferne i komposten dog NPK gødning, hvorved udvinding, oparbejdning og transport af kunstgødning spares. Energiomkostningerne forbundet med denne udvinding, oparbejdning og transport af NPK gødning kan således beregnes.

Da der har været tale om en relativ kort projektperiode (1½ år) - set i lyset af, at der er udviklet en ny proces til behandling af organisk affald, projekteret og opført et fuldskalaanlæg, implementeret fuldskaladrift samt foretaget evaluering af processen - er det oplagt, at der stadig er mange muligheder for driftsoptimering med henblik på at øge processens energiudbytte samt yderligere forædling af kompostprodukter.

Foruden en præsentation af resultaterne fra den gennemførte fuldskalaevaluering, er der derfor opstillet 2 scenarier som tager udgangspunkt i en optimering af det aktuelle koncept ud fra data tilgængelige fra litteraturen.

I scenario 1 fokuseres på at opnå højst muligt energiudbytte samtidig med at der produceres kompost.

I scenario 2 er processen tilrettelagt således, at der ikke fokuseres på kompostproduktion men udelukkende på produktion af biogas og en brændselsfraktion bestående af en tørret rådnere.

I fuldskalaevalueringen og de opstillede scenarier er energiforbruget til indsamling og transport af affaldsfraktioner ikke inddraget. Det vides fra andre undersøgelser, at energiforbruget til indsamling og transport af KOD udgør mindre end 5-10% af den producerede energi ved bioforgasning/forbrænding af KOD, og at dette energiforbrug er nogenlunde ens for de forskellige scenarier (Christensen et al., 2003).

4.7.1 Fuldskaladata: Biogas og kompost

Under biogasprocessen blev der produceret 117 Nm³ (Nm³ = normal kubikmeter, 0 °C, 1.013 millibar) biogas med et metanindhold på 63%

(volumen) per ton behandlet KOD svarende til, at der blev produceret 74 Nm³ metan (se Bilag B samt Tabel 6).

Brændværdien for biogas med et metanindhold på 63% er ca. 23.5 MJ/Nm³ (Lide, 1992) svarende til, at der produceres ca. 2750 MJ per ton KOD. En ny gasmotor er i stand til at omsætte 90% af denne energi til elektricitet (38%) og varme (52%). Energi produceret i form af elektricitet og varme udgør således hhv. 1045 og 1430 MJ/ton KOD. Som angivet i Tabel 5 anvendes der en energimængde svarende til 258 MJ per ton behandlet KOD til drift af biogasanlægget. Processen giver dermed et energioverskud på 2217 MJ per ton behandlet KOD.

Tabel 6: Energiberegning for forbrænding af biogas i gasmotor på biogasanlæg.

Produceret biogas (63 vol-% metan)	Nm ³ /ton KOD	117
Gasmotor:		
Energi ind (100%)	MJ/ton KOD	2750
El ud (38%)	MJ/ton KOD	1045
Varme ud (52%)	MJ/ton KOD	1430
Drift af biogasanlæg (258 MJ/ton KOD, Tabel 5)	MJ/ton KOD	-258
I alt energi ud	MJ/ton KOD	2217

Foruden biogas, blev der produceret 205 kg plastikfraktion med et tørstofindhold på 63% og et glødetab på 85% af tørvægt (Tabel 7). Den nedre brændværdi af plastikfraktionens tørstofindhold blev ikke målt, men undersøgelser udført af Christensen et al. (2003) viser, at sigteresten fra forbehandlet KOD typisk har en nedre brændværdi på mellem 18 og 20 MJ/kg tørstof. Under antagelse af, at plastikfraktionen havde en nedre brændværdi på 19 MJ/kg tørstof, blev der dermed produceret 2453 MJ/ton KOD ved forbrænding på et affaldsforbrændingsanlæg. Af de 2453 MJ/ton KOD blev der dog anvendt 186 MJ/ton KOD til fordampning af plastikfraktionens vandindhold (2,45 MJ/kg vand, se Christensen et al., 2003). Indfyret i affaldsforbrændingsanlægget udgjorde plastikfraktionen således 2268 MJ/ton KOD.

På affaldsforbrændingsanlægget bruges 59 MJ/ton KOD til drift af anlægget hvilket resulterer i, at der produceres 1869 MJ/ton KOD ved afbrænding af plastikfraktionen.

Strukturfraktionen bidrog dog med 30 kg af de 130 kg tørstof, der var repræsenteret i plastikfraktionen. Strukturfraktion vil i beregningen således bidrage til en forøgelse af energiudbyttet, hvis energiudbyttet relateres til per ton behandlet KOD. Tilsvarende genfindes der dog 30 kg tørstof urenheder, primært i form af plastik, i strukturmaterialer som tilbageføres processen (Figur 2). Denne mængde vil i en ligevægtssituation før eller siden ende op i den fraktion, der afsættes til affaldsforbrændingsanlægget og modsvarer dermed de 30 kg tørstof strukturmateriale, der findes i plastikfraktionen. Et energiudbytte på 1869 MJ per ton behandlet KOD ved forbrænding af plastikfraktionen synes derfor ikke at være overestimeret i en ligevægtssituation, hvor strukturmaterialer genbruges i processen.

Tabel 7: Energiberegning for forbrænding af plastikfraktion på affaldsforbrændingsanlæg.

Produceret plastikfraktion	kg/ton KOD	205
Tørstof (63%)	kg/ton KOD	129
Vand (37%)	kg/ton KOD	76
Forbrændingsanlæg:		
Energi ind: (Tørstof * nedre brændværdi, 19 MJ/kg TS)	MJ/ton KOD	2453
Fordampning af vand: (kg vand * 2,45 MJ/kg vand)	MJ/ton KOD	-186
Energi ind affaldsforbrændingsanlæg (100%)	MJ/ton KOD	2268
Ei ud (22%)	MJ/ton KOD	499
Varme ud (63%)	MJ/ton KOD	1429
Drift af forbrændingsanlæg (80 kWh/ton indfyret)	MJ/ton KOD	-59
I alt energi ud:	MJ/ton KOD	1869

Ved anvendelse af komposten på landbrugsjord substitueres en mængde gødning svarende til 2,7 kg kvælstof, 0,6 kg fosfor og 1,5 kg kalium per ton behandlet KOD (Tabel 8). Under antagelse af, at der anvendes hhv. 50, 16 og 8 MJ per kg produceret N, P og K (se Christensen et al., 2003) er energibesparelsen i form af substitueret gødning således 155 MJ per ton KOD.

Tabel 8: Energibesparelse ved substitution af gødning gennem anvendelse af kompost på landbrugsjord.

Substitution af gødning	Enhed	Kvælstof	Fosfor	Kalium
Mængde	Kg/ton KOD	4,5	0,6	1,5
Udnyttelse på mark	%	60	100	100
Substitueret gødning	Kg/ton KOD	2,7	0,6	1,5
Energi behov til produktion	MJ/kg	50	16	8
Energibesparelse	MJ/ton KOD	134	9	12

Det endelige energiregnskab for processen er opstillet i Tabel 9. Heraf fremgår det, at der i alt produceres 4241 MJ per ton behandlet KOD.

Tabel 9: Summering af energiregnskab for "Fuldskaladata: Biogas og kompost".

Produkt	MJ/ton KOD
Biogasanlæg	2217
Forbrænding af plastikfraktion	1869
Substitution af gødning	155
Kompost	0
I alt	4241

4.7.2 Scenario 1: Biogas og kompost – potentiale

Der er et potentiale for at forøge biogasudbyttet. Christensen et al. (2003) målte biogaspotentialet for KOD indsamlet i København, Grindsted, Kolding, Vejle og Aalborg i laboratorieforsøg (fuldt omrørt reaktor indeholdende 23 l biomasse, TS% i indfødt biomasse = 5%, 55°C, opholdstid = 15 døgn). Christensen et al. (2003) fandt et gennemsnitligt gasudbytte på 340 NmL metan per gram biologisk omsætteligt organisk stof svarende til ca. 92 Nm³ metan per ton KOD.

Under antagelse af, at energiudbyttet på fuldskalaanlægget forøges fra 74 Nm³ metan til 92 Nm³ metan per ton KOD, kan energiproduktionen på anlægget forøges med 602 MJ per ton KOD. Et forøget udbytte af biogas kan evt. opnås gennem forhøjet temperatur i procesmodulerne under biogasprocessen eller ved at forøge opholdstiden i procesmodulet.

Plastikfraktionen kan relativt let udtørres vha. aktiv beluftning uden væsentlig forbrug af energi efter sorteringsprocessen, og der ville kunne opnås et tørstofindhold på 80% i stedet for 63% som observeret på anlægget umiddelbart efter sorteringsprocessen. Ved en forhøjelse af tørstofindholdet til 80%, vil energiproduktionen ved forbrænding af plastikfraktionen kunne forøges med 107 MJ per ton behandlet KOD.

En yderligere forhøjelse af energiudbyttet kan opnås ved forbrænding af strukturfraktionen. Forbrænding vil føre til en forhøjelse af energiudbyttet med 1596 MJ per ton behandlet KOD (nedre brændværdi antages at være 18 MJ/kg tørstof).

Tabel 10: Summering af energiregnskab for "Scenario 1. Biogas og kompost – potentiale".

Produkt	MJ/ton KOD
Biogasanlæg	2818
Forbrænding af plastikfraktion	1975
Substitution af gødning	155
Forbrænding af strukturfraktion	1596
I alt	6544

4.7.3 Scenario 2: Biogas og brændsel

Alternativt til produktion af kompost kan der regnes på en model, hvor råmaterialet biogasses og derefter udtørres til et tørstofindhold på 80% til et forbrændingseget produkt. Det vil sige, at der ikke produceres kompost (men slagge og røggasrensingsprodukter i stedet).

Der vil i dette scenario spares energi på anlægget til komposteringsprocessens hygiejniseringsdel, efterkompostering samt til sortering af færdigvaren. Til gengæld anvendes der mere energi til en forøget drift af ventilator i forbindelse med udtørring af det bioforgassede råmateriale. I beregningseksemplet antages dette forøgede energibehov ved udtørringen at svare til energibehovet forbundet med produktion af stabil kompost til jordbrugsformål.

Mængden af energi produceret i form af biogas i dette scenario adskiller sig ikke fra fuldskaladataene. Herudover produceres en brændselsfraktion på ca. 575 kg med et tørstofindhold på 80%, hvilket vil give anledning til at der bliver produceret 6633 MJ per ton behandlet KOD på forbrændingsanlægget (Bilag D). Det samlede udbytte af processen er således 8850 MJ per ton behandlet KOD (Tabel 11). Hvis metanudbyttet forøges til 92 m³ som i scenario 1, vil udbyttet af processen i scenario 2 blive 9452 MJ per ton KOD.

Ved forbrænding af KOD direkte på affaldsforbrændingsanlæg tillagt forbrænding af de 0,5 ton strukturmateriale (krævet til den biologiske proces), vil der blive produceret hhv. 3714 og 3160 MJ (Bilag D) svarende til en

Samlet energiproduktion på 6874 MJ. Merudbyttet ved den biologiske proces kan således opgøres til 1976-2578 MJ per ton behandlet KOD eller 29-38% mere i forhold til direkte forbrænding.

Tabel 11: Summering af energiregnskab for "Scenario 2. Biogas og brændsel".

Produkt	MJ/ton KOD
Biogasanlæg	2217
Forbrænding af plastikfraktion	0
Substitution af gødning	0
Forbrænding af "tørret rådnerest"	6633
I alt	8850

4.7.4 Summering

De opstillede scenarier for produktion af biogas og kompost og/eller diverse andre brændbare fraktioner sammenlignet med forbrænding af KOD og strukturmateriale på et affaldsforbrændingsanlæg (Tabel 14). Det fremgår, at det absolut højeste energiudbytte opnås ved at producere biogas og efterfølgende tørre den ikke-sigtede rådnerest med henblik på forbrænding i et affaldsforbrændingsanlæg. Energiudbyttet er 29% højere end ved forbrænding af de sammenlignelige fraktioner.

Oftestammenlignes bioforgasning af KOD med forbrænding af KOD på et affaldsforbrændingsanlæg ("Fuldskaladata" med "Forbrænding KOD"). Ved denne sammenligning er energiudbyttet ca. 15% højere ved biogasproduktion end ved forbrænding. Det skal dog bemærkes, at den evaluerede teknologi kræver nettotilsætning af ca. 0,30 ton strukturmateriale per ton KOD (Figur 2), som repræsenterer et energitilskud til processen. Den evaluerede teknologi giver dog også anledning til produktion af ca. 0,34 ton kompost (Figur 2), som potentielt repræsenterer en energifraktion i tilfælde af forbrænding.

Tabel 14: Summering af de opstillede scenariers energiregnskab for behandling af 1 ton KOD sammenstillet med energiudbyttet (MJ) ved forbrænding af 1 ton ubehandlet KOD og 0,5 ton strukturmateriale.

Alle data i MJ	Fuldskaladata	Scenario 1 potentiel	Scenario 2 brændsel	Forbrænding KOD	Forbrænding KOD+struktur
Biogasanlæg	2217	2818	2217	0	0
Forbrænding plastikfraktion	1869	1975	0	0	0
Substitution af gødning	155	155	0	0	0
Forbrænding strukturfraktion	0	1596	0	0	3160
Forbrænding tørret rådnerest	0	0	6663	0	0
Forbrænding KOD	0	0	0	3714	3714
I alt	4241	6544	8850	3714	6874
Relativt energiudbytte	62	95	129	54	100

Ud fra en overordnet (energimæssig) betragtning kan værdien af den kompost, der produceres per ton modtaget KOD, opgøres som forskellen mellem fuldskaladataene og Scenario 2. Det vil sige, at fordelene ved anvendelse af kompost til jordbrugsformål bør kunne begrunde en fravalgt

produktion af et brændsel, der indeholder ekstra 4609 MJ per ton modtaget KOD.

Fordelene ved anvendelse af kompost til jordbrugsformål i stedet for til forbrænding kan opremses som følger: Ingen slagge og røggasrensningsprodukter. Gødning og organisk stof til plantedyrkning. Bevarelse af naturressourcer (fosforindvindingsområder, spagnum-indvindingsområder). Bevidsthed om ressourceforbrug og genbrug (Hoitink og Keener, 1993).

4.8 Lugt frigivet under komposteringsprocessen

Kilder til lugt kan være mange på et affaldsbehandlingsanlæg. På biologiske anlæg, der anvender kompostering som en del af behandlingsprocessen, vil specielt procesluft kunne give anledning til lugtgener, da der ofte er tale om relativt store mængder. Lugt fra komposteringsanlæg vil derfor kunne spores i en relativ stor geografisk radius fra anlægget, hvis rensningsprocessen ikke udføres optimalt.

I fuldskalaevalueringen var fokus derfor rettet mod evaluering af biofiltrets effektivitet under komposteringsprocessen, samt mod at beregne den potentielle lugtemission fra anlægget. Resultatet af undersøgelsen er vist i Bilag C, og viser et velfungerende biofilter, der giver anledning til en belastning på ca. 5 lugtenheder (LE) i en radius på op til 140 m fra filteret og 10 LE i en radius på op til 100 m.

Foruden lugtemission fra biofilteret, vil der kunne frigives lugtstoffer fra modtageområdet samt fra komposten under eftermodningsprocessen. For at imødekomme lugtgener konstrueres det fuldt udbyggede anlæg således, at særligt lugtende aktiviteter - såsom forbehandlingen - foregår i lukket hal, hvorfra luften ledes over et biofilter. Herudover vil det være muligt at foretage aktiv beluftning under eftermodningsprocessen, hvilket reducerer risici for dannelse af lugtende forbindelser under denne proces.

5 Vurdering af arbejdsmiljø

Hvor der håndteres KOD, er der en risiko for, at ansatte kan få en række sygdomme, der skyldes påvirkning fra mikroorganismer og/eller deres bestanddele. Påvirkningen sker formentlig primært ved indånding, men der er også mulighed for påvirkning via munden, især ved hånd-mund kontakt. Håndtering af affaldet foretages med maskiner, som kan udgøre en risiko uden forudgående instruktion. Ligeledes vil en manuel håndtering af affald ved maskinstop mv. kunne udgøre en potentiel risiko for stik eller rifter på huden. På evalueringstidspunktet var der ansat en driftsmedarbejder. Den ansatte arbejdede ikke med reaktortanken til biogasproduktionen, da denne blev styret fuldautomatisk og var indrettet i overensstemmelse med gældende lovgivning.

Der blev foretaget en kortlægning af arbejdsmiljøet på fuldskalaanlægget med definition af kritiske kontrolpunkter samt hvilke arbejdsmiljømæssige foranstaltninger der var indført. Der blev desuden foretaget en vurdering af indsatsen og fremsat forslag til forbedringer, som vil blive gennemført på det færdigetablerede anlæg.

5.1 Indretning

I forbindelse med vurdering af anlæggets indretning blev de primære kritiske kontrolpunkter udpeget til at være indånding og kontakt med mikroorganismer i affald, perkolat og støvpartikler.

5.1.1 Modtagehal

Modtagehallen var på fuldskalaanlægget indrettet i en overdækket hal med naturlig ventilation. For bedre at kunne kontrollere lugt fra anlægget og samtidig sikre god luftudskiftning vil modtagehallen på det færdige anlæg blive etableret som en lukket hal med mekanisk ventilation.

Det oplagrede KOD havde i evalueringsperioden en opholdstid på maksimalt 3 døgn, hvilket gav anledning til udsivning af mindre mængder perkolat på gulvarealet. På det færdige anlæg vil KOD blive fjernet dagligt inden arbejdstids ophør (blandes med struktur og føres til procesmodul dagligt), og der vil blive etableret plansiloer til modtagelse af affald.

Bearbejdning af KOD medfører spredning af støv og mikroorganismer i luften. For at minimere denne påvirkning samt lette arbejdsprocessen, bør det overvejes, hvorvidt der kan gennemføres en sammenbygning af blander og sorterværk, således at affaldet ikke skal flyttes mellem disse behandlinger. Ligeledes bør det vurderes, om det er muligt at indkapsle blander og sorterværk og påmontere punktudsug (procesventilation).

5.1.2 Procesmoduler

Procesmodulerne var i gulvet monteret med et udsugningsanlæg til tvangsbeluftning af affaldet (luftskifte på 3.000 m³/time), samt et gennemgående afløb til perkolattank. Udsugningsanlægget fungerede som en **ekstra** sikkerhed ved arbejde i modulerne, idet der her var påbud om brug af åndedrætsværn.

5.1.3 Lagerplads for kompost

Lagerpladsen var placeret på bar jord uden afløb. For at undgå færdsel i evt. perkolat fra komposten vil lagring på det færdige anlæg blive etableret som plansiloer med aktiv beluftning og med fast bund og afløb til perkolattank.

5.1.4 Teknikrum

Teknikrummet med elinstallationer, perkolatfiltre m.m. var placeret bag procesmodulerne. Rensning af perkolatfiltre blev foretaget i forbindelse med tømning af et modul og gav anledning til kraftige lugtgener, hvorfor der var etableret udsugningsanlæg. For at imødegå gener fremover vil filtrene på det færdige anlæg blive placeret udendørs bag hvert procesmodul. Filtrene vil blive sendt til rensning hos ekstern leverandør.

5.1.5 Køreveje

Køreveje var jordstampede veje. Af sikkerheds- og miljømæssige hensyn vil kørevejene blive udført med fast belægning på det færdige anlæg.

5.1.6 Personalefaciliteter

Personalefaciliteter som spiserum og bad var indrettet efter forskrifterne med ren og uren zone og mulighed for håndvask inden spisning. Arbejdstøj blev vasket dagligt.

5.2 Drift

De kritiske kontrolpunkter i forbindelse med driften blev udpeget til at være den daglige kontakt med mikroorganismer i affald, perkolat og støv, ved rengøring af anlæg og maskiner, samt ved håndtering af affald og kompost. Ligeledes var der en sikkerhedsrisiko forbundet med rensning af tilstoppet blander. For at sikre arbejdsmiljøet var der opsat skiltning om brug af åndedrætsværn ved indgang til procesmoduler og i modtagehal.

Traktoren var monteret med et kamera, således at medarbejderen, inde fra den sikrede kabine, kunne justere blanderens aflæsning af affald, i procesmodulet. Medarbejderen kunne derved bedre undgå tilstopning af blanderen, maskinstop og udendørs færdsel i procesmodulet. Traktoren var udstyret med en dødemandsknap, som aktiveredes ved rensning af sneglen i blandevoغن.

Der forelå en instruktion og sikkerhedsregler for brug og rensning af sorterværk og blander. Gummiged og traktor var etableret med overtryksskabine og påmonteret P3 filter for indblæsningsluft.

Støjniveauet fra de anvendte maskiner oversteg 80 db(A), hvorfor der blev anvendt høreværn ved ophold udenfor maskiner, mens disse var i drift.

Tabel 15: Støjbelastning for maskiner anvendt på anlægget

Maskine	Støjbelastning L_{WA} , i.h.t. EC – norm.
Gummiged	109 dB
Traktor	95 dB
Sortererværk	95 dB
20 Ventilatorer på teknikcontainer	80 dB

5.3 Planlægning, tilrettelæggelse og instruktion af arbejdet

På baggrund af leverandørens anvisninger og i samarbejde med virksomhedens sikkerhedsorganisation, vil der blive udarbejdet arbejdsforskrifter for drift, rengøring, reparation og vedligeholdelse i et omfang, der sikrer, at arbejdet kan udføres sikkerheds- og sundhedsmæssigt fuldt forsvarligt. Der skal være beskrevet, hvilke forholdsregler der specielt skal tages for at hindre uheld på anlægget under den daglige drift. Driftsinstruktionen skal føres ajour, når der foretages væsentlige ændringer på anlægget.

Følgende punkter skal som minimum indgå i instrukser og procedurer for anlægget, fordi de specielt tager hensyn til de sikkerhedsmæssige forhold:

- Opstart og nedlukning af anlæg.
- Normal daglig drift.
- Tømning og rengøring af anlæg.
- Reparation og vedligeholdelse af anlæg.
- Unormal drift.

Der gennemføres en skriftlig arbejdspladsvurdering (APV), specielt med henblik på risiko for påvirkning af biologiske agenser.

5.4 Personlige værnemidler

Driftspersonale var vaccineret efter gældende forskrifter og udstyret med:

- Stikfaste handsker til manuel håndtering af KOD affald.
- Vådservietter til aftørring af hænder ved indgang i traktor og gummiged.
- En sommer- og vinter-overtræksdragt.
- Vandafvisende overtræksdragt i tilfælde af regn, samt til brug ved afvaskning af maskiner.
- Skridsikre sikkerhedssko, der dækker hele foden og anklen samt sikkerhedsgummistøvler.
- Helmaske med P3 og støvfilter, der anvendtes ved enhver direkte håndtering af KOD - max. 3 timer daglig. I dette forsøg ved rensning af blander og rundsorterer samt ved rengøring af procesmodul.

- Halvmaske med P3 og støvfilter, som anvendtes som minimum ved udendørs færdsel i modtagehal og procesmoduler.

Hvis langvarig kontakt med KOD (mere end 3 timer) bliver nødvendigt, skal der investeres i og anvendes friskluftforsynet åndedrætsværn.

5.5 Rengøring

Anlægget blev rengjort dagligt, dvs. at alle indendørs installationer blev holdt rene, alt spild blev opsamlet løbende og gulve i arbejdsområder blev rengjort ved fejning med indkapslet fejmaskine. Medarbejderne undgik højtryksspuling af områder/anlæg, hvor der var rester af affald og perkolat. I sjældne tilfælde blev en maskine højtryksspulet og da under anvendelse af personlige værnemidler (helmaske). Ved indlejning af andet sorterværk til sortering af færdigvaren undgik man totalrensning af eget sorterværk. I forbindelse med færdigetableringen af anlægget vil der blive udarbejdet skriftlig instruks for rengøring, herunder for henholdsvis daglig rengøring, ugentlig rengøring og hovedrengøring.

5.6 Personlig hygiejne

Driftsmedarbejderen var blevet underrettet om, at der var forbud mod at spise, ryge og drikke i arbejdsområder, samt at færdsel fra et "beskidt" område til et "rent" område (fx fra modtagehal til kontor eller spiserum) kun bør ske efter håndvask og aftagelse af arbejdstøj. Alle medarbejdere var orienterede, om at de skulle bade ved arbejdstids ophør.

5.7 Sygdom

Driftsmedarbejderen havde arbejdet på anlægget i 14 måneder og haft 1 sygedag, som ikke kunne henføres til arbejdsmiljøet. Ved samtale berettede medarbejderen ikke om ubehag ved arbejdet. Han kunne dog konstatere, at evt. rifter/sår på hænder havde længere helingstid end normalt. Som ekstra beskyttelse blev det besluttet at indkøbe "flydende handsker", som påsmøres hænderne hver morgen inden arbejdet påbegyndes.

5.8 Uddannelse

Den ansatte havde gennemgået en intern informationsdag om proces, drift, sikkerhed og hygiejne. Driftsleder og driftsmedarbejderen havde gennemgået den lovpligtige uddannelse for sikkerhedsgrupper af 37 timers varighed.

6 Økonomiske overslag

Omkostninger forbundet med affaldsbehandling kan overordnet opdeles i følgende kategorier:

1. Anlægsomkostninger.
2. Drift af anlægget (fx personale, maskiner og vedligeholdelse af anlæg).
3. Administration (fx driftsledelse og kvalitetssikring).
4. Øvrige udgifter (fx omkostninger til grund, finansiering, skatter og afgifter).

Anlæggets behandlingskapacitet vil ligeledes have stor betydning for behandlingsprisen. Et relativt stort anlæg vil således kunne opnå en række stordriftsfordele inden for alle omkostningsområder. Anlægget etableret i forbindelse med fuldskalaevalueringen behandlede i 2003 ca. 3.000 ton KOD og 800 ton strukturmateriale i form af neddelt grenaffald. I 2004 blev anlægget udbygget og behandlingskapaciteten udvidet med 8.000 ton KOD. Anlægget er dog projekteret, så det kan udbygges til at behandle 25.000 ton KOD samt 10.000 ton strukturmateriale per år.

I de økonomiske overslagsberegninger tages udgangspunkt i opførelse af et anlæg, med en behandlingskapacitet på 25.000 ton KOD og 10.000 ton strukturmateriale per år, som udtryk for et middelstort anlæg i europæisk målestok.

6.1 Etableringsomkostninger

Omkostningerne til etablering af et anlæg, der anvender det beskrevne koncept, er opgjort i Tabel 16.

Tabel 16: Oversigt over anlægsudgifter forbundet med opførelse af et anlæg til behandling af 25.000 ton KOD og 10.000 ton strukturmateriale per år.

Anlæg	Pris i DKK (2004)
Modtagehal	2.000.000
20 procesmoduler	24.000.000
Gas anlæg incl. reaktortanke og gasmotor	5.500.000
Biofilter	500.000
Efterkomposterings- og produktareal	1.500.000
Belægning på veje og vaskepladser	1.500.000
I alt	35.000.000

Som det fremgår af Tabel 16 er de totale anlægsinvesteringer beregnet til 35.000.000 kr. hvilket svarer til en investering på 1400 kr. per ton årlig KOD kapacitet.

Ohr et al. (2002) gennemførte en økonomisk analyse af forskellige koncepter til organisk affaldsbehandling (herunder våd udrådning med efterkompostering i miler, våd udrådning med flydende slutprodukt, faseseparering med udrådning af flydende fase og kompostering af fast fase, tør udrådning med efterkompostering i miler samt reaktorkompostering). Ohr et al. (2002) fandt, at anlægsinvesteringerne varierede mellem 3600 og 5500

(2002) kr. per ton årlig kapacitet. Udgifterne til etablering af et anlæg, der anvender det udviklede koncept, er dermed under halv pris af, hvad der er normalt for andre anlægskoncepter, der producerer biogas. En anden stor fordel ved det udviklede koncept er, at selve behandlingsdelen (procesmodulerne) kan udbygges, hvis der skulle opstå behov for forøget behandlingskapacitet. Herudover er det muligt at behandle forskellige affaldsfraktioner individuelt, hvilket er forhold, der kan medføre reducerede behandlingsomkostninger.

6.2 Driftsomkostninger

Drift defineres ofte forskelligt afhængig af, om der anlægges en økonomisk eller praktisk synsvinkel. På det eksisterende anlæg defineres driften såvel økonomisk som praktisk til dækning af maskiner, mandskab og vedligehold af anlæg.

Driften på anlægget tager udgangspunkt i, at der kan anvendes almindelige landbrugs- og entreprenørmaskiner, som hurtigt kan serviceres eller erstattes. Dette giver stor forsyningssikkerhed samtidig med, der er tale om billige løsninger sammenlignet med specialmaskiner.

Udgiften forbundet med drift af maskiner og lønudgifter til driftspersonalet udgjorde i projektperioden 125 kr. pr ton behandlet KOD. Herudover kommer omkostninger til service og vedligeholdelse af behandlingsanlægget samt eventuelle reparationer, som er svære at opgøre over en kort evalueringsperiode. Det anslås, at de samlede driftsomkostninger vil udgøre mellem 145 og 210 per ton KOD ved en årlig kapacitet på 25.000 ton.

6.3 Administrationsomkostninger

Administrationsomkostningerne inkluderer bl.a. udgifter til processtyring, kvalitetskontrol, produktudvikling, afsætning af kompost samt omkostninger forbundet med myndighedsbehandling, bogholderi, revisor, advokat mm. Herudover vil der være omkostninger til etablering af administrations- og mandskabsfaciliteter samt brovægt.

I projektperioden blev alle administrationsydelser lejet. Da fuldskalaanlægget er opført i forbindelse med et affaldsdeponi, der råder over administrationsbygninger og brovægt, var det således oplagt at leje disse faciliteter. Administrationsomkostninger blev anslået at udgøre 100 kr. per ton behandlet KOD. På et fuldt udbygget anlæg anslås udgifterne til mellem 80 og 150 kr. per ton afhængig af, om anlægget etableres i forbindelse med et anlæg, der i forvejen råder over administrationsfaciliteter, der kan lejes.

6.4 Øvrige udgifter

Behandlingsomkostningerne er påvirket af samfundets generelle konjunkturer (finansieringsomkostningerne er afhængige af renteniveauet), ligesom skatter og afgifter kan påvirke prisen. Herudover vil en række lokale forhold påvirke behandlingsprisen. Herunder kan nævnes køb/leje af grund, afskrivningsperiode, samt afsætningsmulighederne for elektricitet, varme, biogas og kompost. Potentialet for salg af genbrugsprodukter overestimeres ofte. På det konkrete anlæg er indtægter i form af biogas og kompost derfor ikke værdisat i budgetterne. Gødningsværdien af komposten baseret på

indholdet af NPK kan dog opgøres til ca. 15 kr. per ton kompost. Forbrænding af 1 m³ biogas giver typisk et el-udbytte på mellem 2,0 og 2,5 kWh samt et tilsvarende energiudbytte i form af varme. I Danmark er indtægten på elektricitet opnået fra biogasanlæg 60 øre pr kWh, og typisk indbringer salg af 1 m³ biogas mellem 1,50 og 2,20 kr. for et biogasanlæg (Dansk BioEnergi, 2004).

Da dårligt sorteret affald vil resultere i en større plastikfraktion sammenlignet med rent affald, har kvaliteten af affaldet, der behandles på anlægget, ligeledes en indflydelse på behandlingsprisen. Det er derfor besluttet at differentiere behandlingsprisen efter renheden, for at belønne den gode sortering (hvis affaldet indeholder over 8% fejlsorteringer betales 150 kr. pr ton fejlsorteret materiale af leverandøren). I området, hvor det aktuelle anlæg opføres, er udgiften til forbrænding 730 kr. per ton incl. statsafgift.

Behandling af affald involverer en fortjeneste til ejerne, som typisk dækker forrentning af egenkapitalen samt udvikling af teknologi.

Som det fremgår kan øvrige udgifter have en stor betydning for behandlingsprisen. Øvrige udgifter blev anslået til ca. 200 kr. per ton KOD. Værdisættes biogassen til 1,50 til 2,00 kr. per m³ biogas, kan udgifterne dog reduceres med 170-230 kr. per ton KOD.

6.5 Behandlingspris

Erfaringerne på anlægget har vist, at den totale behandling af KOD pt. kan udføres for 750 kr. per ton KOD ved en årlig kapacitet på 5.000-6.000 ton. Prisen kan dog bringes ned ved stigende mængder. Anlægget er dimensioneret til en samlet mængde på 25.000 ton KOD og 10.000 ton strukturmateriale (i det konkrete tilfælde nedknust grenaffald). Anlægget udbygges i takt med, at der opnås kontrakter på affaldsmængderne. Det forudses, at prisen bliver 500 kr. per ton KOD ved fuld udnyttelse af udbygget kapacitet.

7 Konklusion

Projektet på fuldskalaniveau har vist, at det er muligt at udføre en kombineret bioforgasning og kompostering af KOD uden frasortering af urenheder før den biologiske proces. Herved reduceres omkostningerne til forbehandling, og der produceres ikke en restfraktion med et højt indhold af biologisk omsætteligt materiale. Produkterne fra den biologiske proces er energi i form af biogas samt kompost.

Processens gasudbytte blev evalueret i laboratorie-, pilotskala- og fuldskalaniveau, og resulterede i 74-80 Nm³ metan per ton KOD med strukturmateriale (blandingsforhold: 0,5 ton neddelt grenaffald til 1 ton KOD). For den aktuelle fuldskalaevaluering, resulterede processen i et nettoenergiudbytte på 4241 MJ per ton behandlet KOD med strukturmateriale. Herudover blev der produceret 341 kg kompost samt 198 kg strukturmateriale, der kunne genbruges i processen. Af de 6,1 kg kvælstof og 0,93 kg fosfor, der blev tilført processen, blev størstedelen genfundet i kompost- og strukturfraktionerne (hhv. 81% og 90%), og kunne således tilbageføres til det biologiske kredsløb.

Energiudbyttet af processen kan forøges væsentligt, hvis produktion af kompost nedprioriteres. Gennem teoretiske scenarier er det således vist, at det absolut højeste energiudbytte opnås ved at producere biogas og efterfølgende at tørre den ikke-sigtede rådnerest med henblik på forbrænding i et affaldsforbrændingsanlæg. Denne behandling kan potentielt give et energiudbytte på 8850 MJ for 1 ton KOD og 0,5 ton strukturmateriale. Fordelene ved produktion af kompost til jordbrugsformål i stedet for forbrændingsfraktioner er dog åbenlyse; ingen slagge og røggasrensingsprodukter, gødning og organisk stof til plantedyrkning, bevarelse af naturressourcer (fosforindvindingsområder, spagnum-indvindingsområder) samt bevidsthed om ressourceforbrug og genbrug.

Processen viste sig at være meget robust på fuldskalaniveau. Der er i projektperioden (1. februar 2003 til 31. december 2004) således behandlet ca. 14.000 ton KOD på anlægget.

Resultater af arbejdsmiljø på fuldskalaniveau præsenteres. Herudover blev emissionen af lugt fra anlæggets biofilter målt under komposteringsprocessen. Resultatet af undersøgelsen viste et velfungerende biofilter, der gav anledning til en belastning på ca. 5 lugtenheder i en radius på op til 140 m fra filteret.

De økonomiske overslag for anlægsomkostninger, drifts- og administrationsudgifter forbundet med behandlingsløsningen er præsenteret. De økonomiske overslagsberegninger viser, at et anlæg til 25.000 ton KOD per år kræver en investering på 35 mio. kr. (2004). Driftsomkostningerne anslås til 145-210 kr. per ton KOD og administrationsomkostningerne til 80-150 kr. per ton KOD. Det anslås, at et anlæg projekteret til at kunne behandle 25.000 ton KOD per år, kan drives for en behandlingspris på ca. 500 kr. per ton KOD alt inkl. ved fuld udnyttelse af kapaciteten.

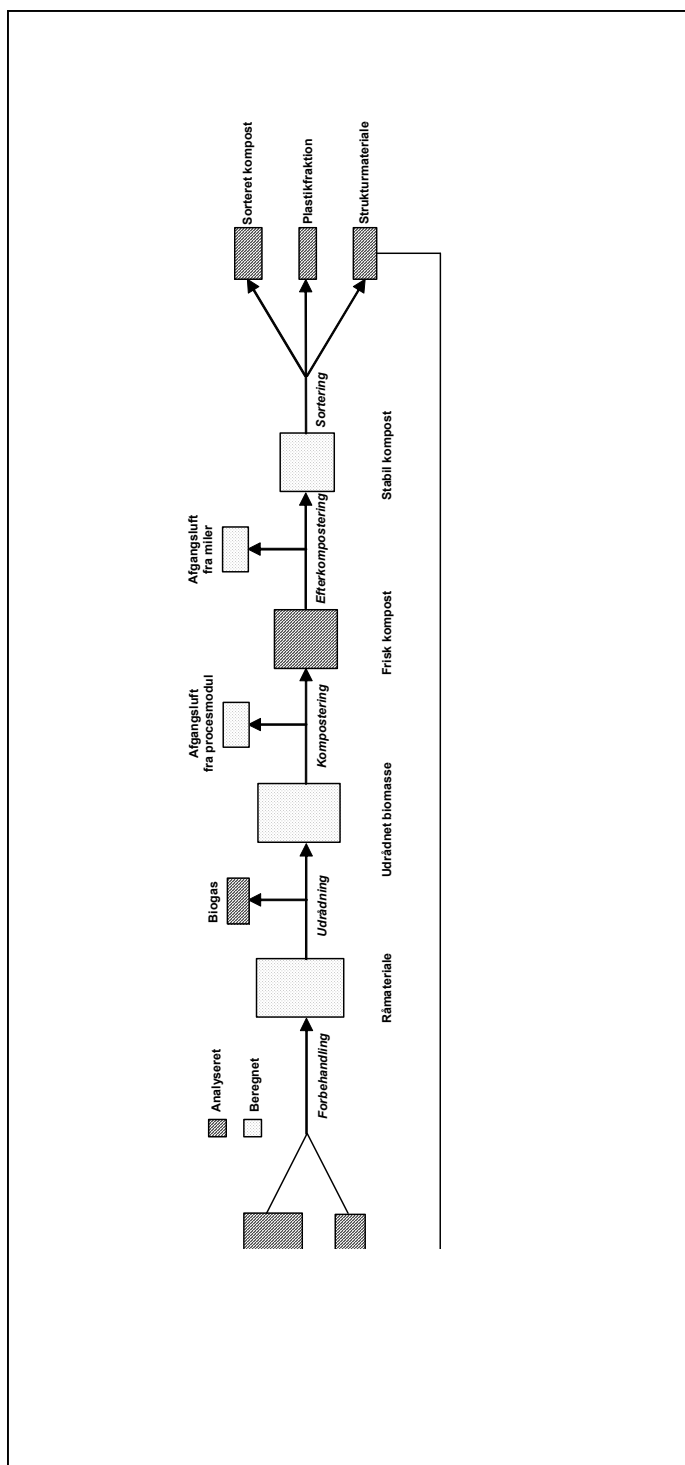
8 Referencer

- Affaldsstrategi 2005-2008, 2003. Miljøstyrelsen, Regeringen, Danmark.
- CEN EN 13039, 1999. Soil improvers and growing media – Determination of organic matter content and ash. European Standard, Brussels, Belgium.
- CEN EN 13040, 1999. Soil improvers and growing media – Sample preparation for chemical and physical tests, determination of dry matter content, moisture content and laboratory compacted bulk density. European Standard, Brussels, Belgium.
- Christensen, T.H., T.L. Hansen, J. Kirkerby, J.C. Jansen, Å. Svärd, J.K. Toudal, T. Hulgaard, H.W. Rasmussen, C. Gruvberger, 2003. Basisdokumentation for biogaspotentialiet i organisk dagrenovation. Miljøprojekt nr. 802, 2003. Miljøstyrelsen.
- Christensen, K.K., Kron, E., Carlsbæk, M., 2001. Development of a Nordic system for evaluating the sanitary quality of compost. Environment, TemaNord 2001:550. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark.
- Christensen, K.K., Carlsbæk, M., Norgaard, E., Warberg, K.H., Venelampi, O., Brøgger, M., 2002a. Supervision of the sanitary quality of composting in the Nordic Countries. TemaNord 2002:567, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark.
- Christensen, K.K., Kron, E., Carlsbæk, M., 2002b. Strategies for evaluating the sanitary quality of composting. J. Appl. Microbiol., 92: 1143-1158.
- Dansk BioEnergi, 2004. Biogas-statistik for biogasfællesanlæg i maj/juni. BioPress, Danmark.
- DS 292 2nd ed., 1985. Vandundersøgelse. Total phosphor. Fotometrisk metode.
- Hogg, D., E. Favoino, N. Nielsen, J. Thomson, K. Wood, A. Penschke, D. Economides, S. Papageorgiou, 2002. Economic analysis of options for managing biodegradable municipal waste. Final report to the European Commission. By Eunomia research & consulting, UK. Available at: <http://europa.eu.int/comm/environment/waste/compost>
- Hoitink, H.A.J., Keener, H.M. (Eds.), 1993. Science and engineering of composting: Design, environmental, microbiological and utilization aspects. The Ohio State University, Renaissance Publications, Ohio, USA.
- Lide, D.R., 1992. Handbook of chemistry and physics, 73rd ed. 1992-1993. CRC Press.

- Miljøstyrelsen, 2003. Skal husholdningernes madaffald brændes eller genanvendes. Samfundsøkonomisk analyse af øget genanvendelse af organisk dagrenovation. Miljøprojekt nr. 814, 2003. Miljøstyrelsen.
- NMKL no. 68, 2nd ed., 1992. Nordic committee on food analysis. ***Enterococcus***. Determination in foods. UCD 576.851.21.
- NMKL No. 71, 4th ed., 1991. Nordic committee on food analysis. ***Salmonella*** bacteria. Detection in foods. UCD 579.842.14.
- NMKL no. 91, 2nd ed., 1988. Nordic committee on food analysis. Pretreatment of foods for microbiological examination. UCD 576.8.08:614.31.
- NMKL no. 125, 3rd ed., 1996. Nordic committee on food analysis. Thermotolerant coliform bacteria. Enumeration in foods. UCD 576.851.48.
- Ohr, K., Førland, O.S., Birkenes, V.Ø., 2002. Biogass – Energiproduksjon og avfallsbehandling. ORIO-programmet prosjekt nr. 0202. Asplan Viak, Norge.

Bilag A: Processkema

Oversigt over processen med angivelse af, fra hvilke fraktioner der blev udtaget prøver til analyse og hvilke fraktioner, der er beregnet.



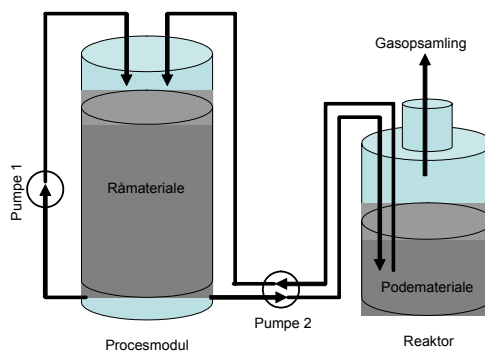
Bilag B: Biogasproduktion

For at få det bedst mulige grundlag for at vurdere processens gasudbytte, blev der gennemført laboratorieforsøg og pilotskalaforøg udover selve fuldskalaevalueringen. Et resumé af resultaterne er præsenteret i dette bilag. Forsøgene viste, at der generelt var god overensstemmelse mellem de tre niveauer for gasudbyttet af KOD indsamlet fra Noveren's kommuner. Laboratorieforsøgene viste et gasudbytte på 78 Nm^3 metan per ton KOD, pilotskalaforøget viste et udbytte $74\text{-}80 \text{ Nm}^3$ metan per ton KOD, mens udbyttet fra fuldskalaevalueringen var på 75 Nm^3 metan per ton KOD.

Laboratorieforsøg

Opstilling

Der blev anvendt en PVC beholder på $0,7 \text{ l}$ (procesmodul) hvori neddelte KOD blandet med strukturmateriale (savsmuld) blev placeret (i alt 75 g blandet i vægtforholdet 3:2). Herefter blev der tilsat ca. 20 ml vand. Perkolat opsamlet i bunden af beholderen blev pumpet ind over råmaterialet. Løbende blev perkolat fra



Figur 1: Opstilling til måling af gasudbytte i laboratorium

beholderen, hvori råmaterialet var placeret, overført til en glasbeholder på $0,5 \text{ l}$ som var podet med metandannende bakterier fra pilotskalaanlægget (reaktoren). Sideløbende med denne proces, blev der tilbageført en tilsvarende mængde perkolat fra reaktoren til procesmodulet for, at opretholde et konstant volumen i reaktoren. Mængden af gas produceret i reaktoren blev løbende opsamlet og analyseret for CO_2 og metan. Alle forsøg blev udført ved 35°C .

Gasudbytte

Gasudbyttet blev evalueret for en række laboratorieforsøg som viste, at en meget stor del ($> 80\%$) af det nedbrydelige kulstof var tilgængeligt for bioforgasning allerede efter 2 dage. VFA udgjorde mellem 50 og 80% af den samlede mængde bioforgasset kulstof. Laktat dominerede i starten, men blev afløst af acetat og iso-butyrat. Der blev opnået et gasudbytte på 350 l metan per kg VS svarende til 78 m^3 metan pr ton KOD (produceret biogas indeholdt 65% metan).

Pilotskalaforsøg

Opstilling

Der blev etableret 2 pilotanlæg bestående af et procesmodul konstrueret i beton på 1500 l og metandannelse i en 1.000 l reaktortank. Perkolatet blev cirkuleret mellem procesmodul og reaktortanken. Det var ligeledes muligt at kontrollere temperaturen i reaktortanken, ligesom temperaturen på perkolatet, der blev tilført procesmodul, kunne kontrolleres. Hele anlægget var PLC-styret og mængden af produceret biogas blev opgjort løbende, hvorefter gassen blev brændt.



Procesmoduler bestod af betonbrødringe som var placeret i det fri.

Reaktortankene (palletanke) var placeret i en isoleret container sammen med styrings og gasopsamlingsudstyr.



Styringsenhed med pumpe, ventiler og opvarmningsenhed. Perkolat blev løbende opvarmet og udvekslet mellem procesmodul og reaktor med fastsatte frekvenser.

Biogas fra reaktoren blev ledt til vandudskiller (nedkøling i køleskab) hvorefter den producerede gas blev kvantificeret og brændt.

Gasudbytte

Foruden indkøring af pilotanlægget og processen, blev der udført 2 udrådningsforsøg med affald indsamlet fra Noveren's kommuner i perioden fra juni til september 2003. KOD fra Noveren's kommuner blev brugt i forsøgene, og samme udstyr og rutiner blev anvendt til forbehandling som på fuldskalaanlægget. Råmaterialet, brugt i pilotskalaforsøgene, var dermed

direkte sammenligneligt med fuldskalaevalueringen. I pilotskalafor søgene blev temperaturen i reaktoren holdt på 35-38°C, mens temperaturen i procesmodulet varierede mellem 25 og 33°C. I forsøgene blev der over en 6 ugers periode produceret 100-120 m³ biogas svarende til 74-80 m³ metan per ton KOD (metanindholdet i biogassen varierede på mellem 65 og 80%). Gasudbyttet var således tæt på de værdier, der blev opnået i laboratoriet. Opholdstiden på 6 uger i pilotskalafor søgene, var dog væsentlig længere end i laboratorieforsøgene. Den længere opholdstid i pilotskalafor søgene kan tilskrives, at der blev anvendt et grovere neddelt råmateriale fra fuldskalaanlægget, sammenlignet med laboratorieforsøgene hvor råmaterialet blev findelt.

Fuldskalaevaluering

Metoder

Mængden af produceret biogas blev løbende registreret vha. flowmåler installeret på gasledningen umiddelbart efter reaktortanken. Prøver af gassen blev udtaget 3 gange per uge til analyse for CH₄ og CO₂. Mængden af vand fraført med biogassen, blev beregnet ud fra temperaturen i reaktortanken under antagelse af, at biogassen var 100 % mættet med vanddamp.

Indledende forsøg viste, at flowmåleren var ustabil i drift pga. højt vandindhold i gassen. Det blev derfor besluttet, at bestemme gasproduktionen sideløbende. Gaspotentialet af perkolat tilført reaktortanken fra procesmodulet blev målt i laboratorieforsøg. Ud fra daglige registreringer af gaspotentiale og volumen af tilført perkolat til reaktortanke, kunne gasproduktionen dermed estimeres. Det var ikke muligt at bestemme gasproduktionen ud fra gasmotorens el-produktion, da denne blev forsynet med gas fra både reaktoren og det eksisterende affaldsdeponi.

Der blev dagligt udtaget prøver af perkolat opsamlet fra procesmodulet, som blev frosset (-18°C) indtil bestemmelse af gaspotentialet. Gaspotentialet af perkolat fra procesmodulet, blev bestemt ved at tilsætte 4 ml af perkolatet til en 120 ml glasflaske, tilsat 30 ml podemateriale (fra mesofil rådnetank fra Ålborg Øst rensningsanlæg). Flasken blev lukket med en prop, hvorefter gasfasen blev fortrængt med N₂ for at sikre anaerobe forhold ved forsøgets start. Herefter blev flaskerne inkuberet ved 35°C på rystebord. Foruden prøverne tilsat perkolat, blev der inkuberet kontrolprøver som udelukkende indeholdt podemateriale. Mængden af produceret biogas blev bestemt dagligt, ved at føre en glaskanyle påmonteret en sprøjte gennem proppen. Gastrykket ekspanderede herefter sprøjtens letløbende stempel, hvorefter mængden af produceret gas kunne aflæses. Gasprøverne blev overført til evakuerede venojects, som blev opbevaret ved 5°C indtil analyse for metan og CO₂ på Chrompack Packard CP 9002 gaskromatograf udstyret med TDC detekter. Gasudviklingen blev fulgt indtil der ikke kunne registreres yderligere gasproduktion.

Gasudbytte

Da flowmåleren monteret på gasledningen var meget ustabil i drift, var det ikke muligt at bestemme mængden af produceret biogas vha. denne. Dataene for produceret biogas i fuldskalafor søget er derfor udelukkende baseret på volumen, samt biogaspotentiale af perkolatet opsamlet fra procesmodulet.

I fuldskalaforsøget blev den anaerobe proces fastsat til 6 uger ud fra erfaringer fra pilotskalaforsøgene. I denne periode blev der tilført mellem 60 og 300 l perkolat i timen fra procesmodulet til reaktortanken. Gaspotentialet af perkolat fra procesmodulet var på op til 180 m³ per m³ perkolat. Summeret over 6 uger, blev der produceret 22.100 m³ biogas med et metan-indhold på 60-70%, svarende til en metan-produktion 80 m³ per ton KOD.

En gasproduktion på 80 m³ metan per ton KOD er overestimeret, da der vil tilbageføres organisk stof fra den aktive reaktor, ved flytning af perkolat fra reaktoren til procesmodulet. Gaspotentialet af perkolat fra reaktoren blev dog ikke målt i det aktuelle forsøg, hvilket vanskeliggør en kvantificering af overestimeringen. Der blev dog løbende målt på koncentrationen af VFA (laktat, acetat, propionat, n-butyrat, format og iso-butyrat) i reaktoren. Et groft estimat for gas-potentiale tilbageført til reaktoren kan derfor beregnes ud fra Buswell's formel ($C_xH_yO_z = (x/2 + y/8 - z/4) CH_4$) som muliggør kvantificering af gaspotentialet ud fra VFA-koncentrationen. Ud fra Buswell's formel, samt mængden af perkolat flyttet fra reaktoren til procesmodulet, kan det beregnes, at gasproduktionen i reaktortanken kan være overestimeret med 7,0 m³ biogas per ton KOD svarende til 4,6 m³ metan per ton KOD i forsøgsperioden.


Et samlet gasudbytte for processen kan anslås til 116 m³ biogas eller ca. 75 m³ metan per ton KOD, hvilket stemmer fint overens med resultaterne fra laboratorie- og pilotskalaforsøgene, som gav værdier på hhv. 78 og 74-80 m³ metan per ton KOD.

Generel t

Alle ovennævnte gasudbytter er baseret på råmateriale bestående af 1 ton KOD blandet med 0,5 ton strukturmateriale i form af neddelt grenaffald (på nær laboratorieforsøgene, hvor der blev anvendt savsmuld som strukturmateriale). Mængden af produceret biogas relateret til KOD kan derfor være overestimeret, da det ikke kan udelukkes, at grenaffaldet bidrager til gasproduktionen. Alle forsøg blev dog udført med grenaffald indsamlet om vinteren, og var således frit for løvmateriale. Pt. undersøges gaspotentialet af strukturmaterialet, således at modregning herfor er muligt, og gasudbyttet kan relateres udelukkende til KOD. Udbyttet må dog antages at være meget begrænset, da vedmateriale er svært omsætteligt under biogasprocessen. I massebalanceberegningerne for fuldskalaforsøgene er der anvendt et biogasudbutte på 117 Nm³ per ton KOD (svarende til 1,5 ton råmateriale), svarende til 74 Nm³ metan per ton KOD, som er det laveste metanudbytte, der er registreret i såvel laboratorie-, pilotskala- og fuldskalaforsøg.

Bilag C: Lugtmåling

Analyserapport fra Slagteriernes Forskningsinstitut for lugtprøver udtaget fra biofilter den 20. marts 2004.

	SLAGTERIERNES FORSKNINGSinSTITUT
19. april 2004 SFDokument: 20791.1 PHe/ML	Ref. nr.: 27751 Notat FORTROLIGT¹
Kontrol af lugtbidraget fra Avdebo Kompost af Pierre Hejnfelt	
Sammendrag	
<i>Problemstilling</i>	Solum Gruppen har anmodet Slagteriernes Forskningsinstitut om måling af den udsendte lugtmængde fra Avdebo Kompost. Ud fra disse målinger gennemføres en spredningsberegning med OML-modellen for at fastlægge lugtbelastningen i området omkring komposttankene.
<i>Konklusion</i>	Ud fra beregningsresultaterne kan det konstateres, at lugtbelastningen fra de to kompostbeholdere er som følger: Inkl. effekt fra nærliggende bygning NV for beholderne: 110 – 130 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 5 LE/m ³ . 75 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 10 LE/m ³ . Excl. effekt fra nærliggende bygning: 120 – 140 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 5 LE/m ³ . 75 – 100 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 10 LE/m ³ .
<hr/> ¹ Rekvireret konsulentarbejde – fortroligt. Materialet udleveres ikke til tredjepart uden rekvirentens skriftlige accept. Materialet må ikke anvendes i reklamesøjemed uden samtykke fra Slagteriernes Forskningsinstitut. 1 af 3	

Indledning

Solum Gruppen har anmodet Slagteriernes Forskningsinstitut om måling af den udsendte lugtmængde fra 2 kompostbeholdere på adressen: Hagesholmvej 7, Avdebo, 4532 Gislinge.

Ud fra disse målinger gennemføres en spredningsberegning med OML-modellen for at fastlægge de aktuelle afkasts lugtbelastning i området omkring beholderne.

Lugtanalyser

Lugtprøver (3 stk.) blev udtaget den 30. marts 2004 fra samme kompostbeholder. Prøverne blev endvidere udtaget 3 forskellige steder fordelt over beholdertværsnittet.

Prøvningsrapport er vedlagt som bilag A

Ved analysen blev følgende lugtstyrker bestemt:

Udtagning fra	Luftmængder m ³ /h	Lugtstyrke OU _e /m ³	Lugtstyrke LE/m ³	Bemærkninger Produktion
Kompostbeholder	1270	1400	933	Normal drift
Kompostbeholder	1270	2000	1333	Normal drift
Kompostbeholder	1270	1100	733	Normal drift

For at kunne anvende lugtstyrker bestemt efter CEN-normen i forhold til grænseværdier angivet i LE/m³ skal værdierne – i henhold til gældende lugtvejledning – divideres med lugtpanelets følsomhedsfaktor. Panelets følsomhedsfaktor er 1,5.

Af ovenstående skema fremgår såvel de ukorrigerede som de korrigerede lugtstyrker.

Som input til OML-beregningen anvendes den gennemsnitlige lugtstyrke af de 3 lugtprøver som blev udtaget.

Med hensyn til luftmængder, som afgives fra kompostbeholderne, er anvendt de på måletidspunktet aktuelle mængder (1270 m³/time pr. beholder jævnt fordelt på beholdertværsnittet).

Kilder

OML-beregning

Beregningsen omfatter 2 kompostbeholdere fra Avdebo Kompost.

Kildeplacering fremgår af bilag B.

Beregningsresultater Beregningerne er udført med OML-Multi 5.03 (arealkilder), beregningsresultaterne fremgår af bilag C.

Konklusion

Ud fra beregningsresultaterne kan det konstateres, at lugtbelastningen fra de to kompostbeholdere udgør følgende:

Inkl. effekt fra nærliggende bygning NV for beholderne:

110 – 130 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 5 LE/m³.

75 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 10 LE/m³.

Excl. effekt fra nærliggende bygning:

120 – 140 m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 5 LE/m³.

75 - 100m vest, øst, nord og syd for kompostbeholderne ca. 10 LE/m³.

Bilag A til analyserapport

SLAGTERIERNES FORSKNINGSinSTITUT

Slagteriernes Forskningsinstitut
Maglegårdsvej 2, Postboks 57, 4000 Roskilde, TH 46 30 30 30 - Fax 46 30 31 32
Postgiro: 5 46 99 88 - Internet: www.dnri.com - E-mail: dnri@danishmeat.dk - CVR-nr. 69 44 75 11

Bilag A



 **DANAK**
Reg.nr. 392

Morten Brøgger
SOLUM Gruppen
Vadsbystræde 6
2640 Hedehusene

20. april 2004
Rapport nr.: 46041/PHe/MT
Antal sider i alt: 4

Konsulentarbejde - fortroligt¹

Prøvningsrapport - projekt nr. 27751

Prøver modtaget: 30. marts 2004.

Prøvemateriale: Lugtprøver udtaget den 30. marts 2004.

Antal prøver: 3 stk.

Analyser: Analysemetode til lugtmåling efter CEN-norm
(CEN/TC264/WG2/N222/e, release 98-05-04), analyseforskrift
66009-ANF-012 - udgave 06.

Prøveudtagning: Udtagning af prøver til lugtanalyse efter CEN-normen
(CEN/TC264/WG2/N222/e, release 98-05-04), analyseforskrift
66009-ANF-016 - udgave 04.

Analyse påbegyndt: 31. marts 2004.

Afvielser fra
analysemetode: Udtagning: Udtaget fra arealkilde
Analyse: Ingen.

Resultatskema: Bilag 1 og 2. Bilag 2 er uden for akkrediteringen.

Med venlig hilsen



Inger-Lise E. Andersen

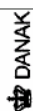


Pierre Hejnfeldt

Rapporten må kun gengives i sin helhed. Hvis der gengives uddrag af rapporten, skal laboratoriets skriftlige tilladelse indhentes. Hvis prøverne er udtaget fra et større parti, er de i rapporten angivne resultater ikke gældende for hele partiet, men kun for de undersøgte delprøver. Resultater gælder kun for de modtagne prøver.

Eventuelle reklamationer skal være skriftlige og være Slagteriernes Forskningsinstitut i hænde senest én måned efter rapportens udstedelsesdato.

¹ Rekvireret konsulentarbejde - fortroligt. Materialet udleveres ikke til tredjemand uden rekvirentens skriftlige accept. Materialet må ikke anvendes i reklamøjndel uden samtykke fra Slagteriernes Forskningsinstitut.



Reg.nr. 392
20. april 2004
Rapport nr.: 4604/PPE/NTT

Bilag 1

SOLLIM GRUPPEN
Morten Brægger

Prøverne er analyseret på SF's lugtlaboratorium den 31. marts 2004
Lugtprøverne er alle udtaget fra Avedbo Kompost

Prøve nr.	Udtagning fra	Udtagning Dato/ Kl.	Vari- hed min	Målt luft- stighed m/s	Tvær- snit på afkast m	Luft- mæng- der m ³ /h	Temp. °C t _{br}	RF %	Forfor- tynding med N ₂ J/N	Filtre- ring for støv J/N	Udlags- posi- tion C/O	Lugtsv- rke OU _L / m ³	Bemærkninger Produktion
302399	Kompos- t-beholder	30/03 10.00	4	2,8	ø0,4	1.270	12	-	N	N	O	1.400	Normal drift
302400	Kompos- t-beholder	30/03 10.20	4	2,8	ø0,4	1.270	12	-	N	N	O	2.000	Normal drift
302401	Kompos- t-beholder	30/03 10.40	4	2,8	ø0,4	1.270	12	-	N	N	O	1.100	Normal drift

Bilag 2 (Udenfor akkreditering)

Prøverne er analyseret på SF's lugtlaboratorium den 31. marts 2004

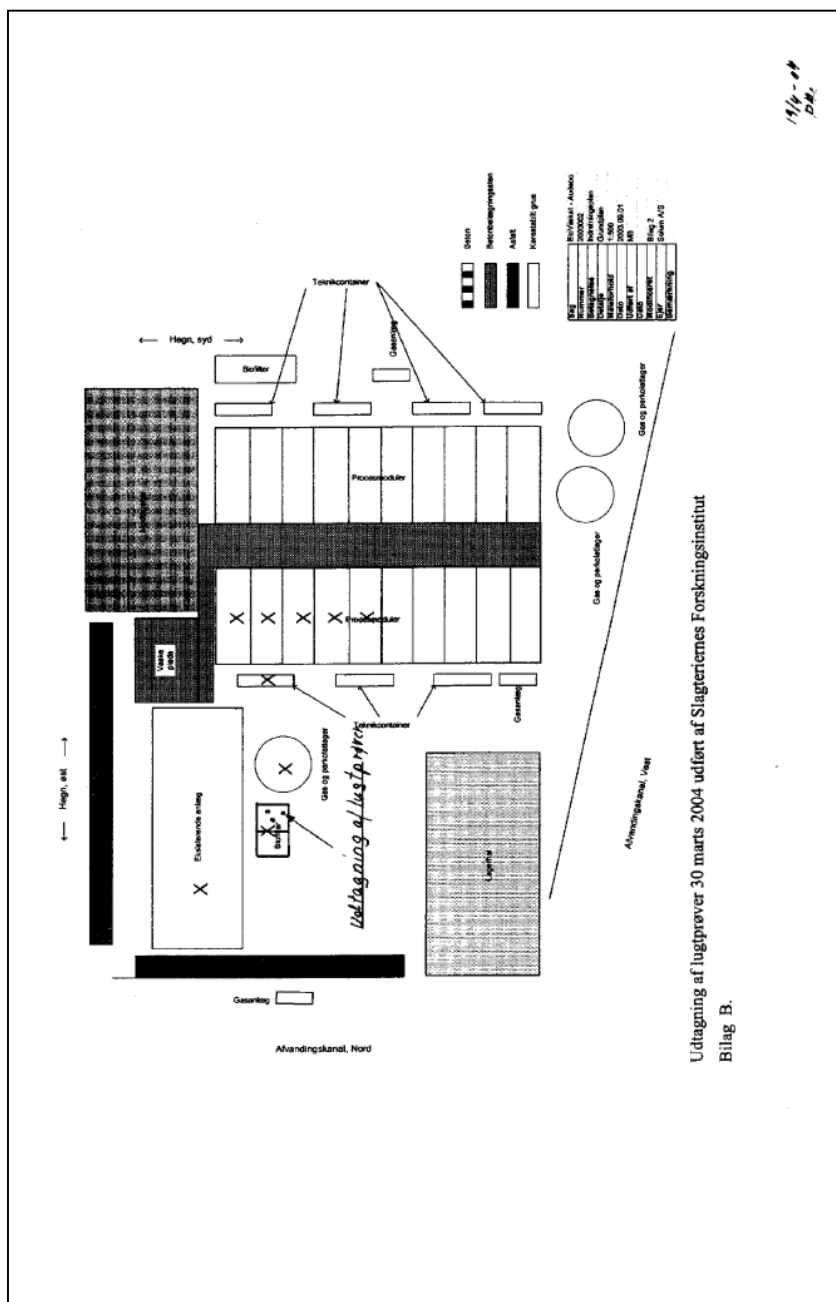
Lugtprøverne er alle udtaget fra Avedø Kompost

Prøve nr.	Udtagning fra	Udtagning Dato/ Kl.	Tversnit på aflast m	Luftmængde m ³ /h	Temp. °C T_{avg}	Lugstyrke OU _g /m ³	Lugstyrke LE/m ³	Bemærkninger
302399	Kompostbeholder	30/03 10.00	ø 0,4	1.270	12	1.400	930	Produktion
302400	Kompostbeholder	30/03 10.20	ø 0,4	1.270	12	2.000	1.300	Normal drift
302401	Kompostbeholder	30/03 10.40	ø 0,4	1.270	12	1.100	730	Normal drift

Lugtpanels følsomhedsfaktor kan opgives til 1,5.
Følsomhedsfaktoren bestemmes i henhold til lugtvejledningen.
Angivelse af usikkerhed: Indtil videre henvises til Mijøstyrelsens metodeblad nr. MEL 13 for lugtmåling, hvor den samlede usikkerhed for prøvetagning og analyse angives -56% - 140%.



Bilag B til analyserapport



Udtagning af ligtprov 30 marts 2004 udført af Slagteriernes Forskningsinstitut
 Bilag B.

Bilag C til analyserapport



Bilag D: Energi ved forbrænding

Beregning af energiudbytte ved forbrænding af brændselsfraktion, KOD og strukturmateriale på kraftvarme-anlæg.

Tabel A: Energiberegning for forbrænding af brændselsfraktion på affaldsforbrændingsanlæg.

Forbrænding af brændselsfraktion	Enhed	Værdi
Produceret brændselsfraktion	kg/ton KOD	575
Tørstof (80%)	kg/ton KOD	460
Vand (20%)	kg/ton KOD	115
Affaldsforbrændingsanlæg:		
Energi ind: (Tørstof * nedre brændværdi, 18 MJ/kg TS)	MJ/ton KOD	8280
Fordampning af vand: (kg vand * 2,45 MJ/kg vand)	MJ/ton KOD	-282
Energi ind affaldsforbrændingsanlæg (100%)	MJ/ton KOD	7998
Ei ud (22%)	MJ/ton KOD	1760
Varme ud (63%)	MJ/ton KOD	5039
Drift af forbrændingsanlæg (80 kWh/ton indfyret)	MJ/ton KOD	-166
I alt energi ud:	MJ/ton KOD	6633

Tabel B: Energiberegning for forbrænding af 1 ton KOD på affaldsforbrændingsanlæg.

Forbrænding af KOD	Enhed	Værdi
KOD	kg/ton KOD	1000
Tørstof (35%)	kg/ton KOD	350
Vand (75%)	kg/ton KOD	650
Affaldsforbrændingsanlæg:		
Energi ind: (Tørstof * nedre brændværdi, 18 MJ/kg TS)	MJ/ton KOD	6300
Fordampning af vand: (kg vand * 2,45 MJ/kg vand)	MJ/ton KOD	1593
Energi ind affaldsforbrændingsanlæg (100%)	MJ/ton KOD	4708
Ei ud (22%)	MJ/ton KOD	1036
Varme ud (63%)	MJ/ton KOD	2966
Drift af forbrændingsanlæg (80 kWh/ton indfyret)	MJ/ton KOD	-288
I alt energi ud:	MJ/ton KOD	3714

Tabel C: Energiberegning for forbrænding af 0,5 ton strukturmateriale på affaldsforbrændingsanlæg.

Forbrænding af strukturfraktion	Enhed	Værdi
Strukturfraktion	kg/ton KOD	500
Tørstof (50%)	kg/ton KOD	250
Vand (50%)	kg/ton KOD	250
Affaldsforbrændingsanlæg:		
Energi ind: (Tørstof * nedre brændværdi, 18 MJ/kg TS)	MJ/ton KOD	4500
Fordampning af vand: (kg vand * 2,45 MJ/kg vand)	MJ/ton KOD	613
Energi ind affaldsforbrændingsanlæg (100%)	MJ/ton KOD	3887
Ei ud (22%)	MJ/ton KOD	855
Varme ud (63%)	MJ/ton KOD	2449
Drift af forbrændingsanlæg (80 kWh/ton indfyret)	MJ/ton KOD	-144
I alt energi ud:	MJ/ton KOD	3160