

Miljøprojekt Nr. 802 2003

# Basisdokumentation for biogaspotentialiet i organisk dagrenovation

Thomas Højlund Christensen, Trine Lund Hansen og  
Janus T. Kirkerby  
Danmarks Tekniske Universitet

Jens la Cour Jansen og Åsa Svärd  
Lunds Tekniske Högskola

Jens Kjems Toudal, Tore Hulgaard og Hans W. Rasmussen,  
Rambøll

Christopher Gruvberger  
VA-Verket

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

<b>INDHOLD</b>	<b>3</b>
<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>	<b>7</b>
<b>SUMMARY AND CONCLUSIONS</b>	<b>11</b>
<b>INDLEDNING</b>	<b>15</b>
1.1    UNDERSØGELSENS BAGGRUND	15
1.2    UNDERSØGELSENS FORMÅL OG INDHOLD	16
1.3    RAPPORTENS OPBYGNING	17
<b>2    STATUS ÅR 2000</b>	<b>19</b>
2.1    DANSKE ERFARINGER OM INDSAMLEDE MÆNGDER AF KILDESORTERET ORGANISK DAGRENOVATION	19
2.2    DANSKE DATA OM BIOFORGASNING AF KILDESORTERET ORGANISK DAGRENOVATION	20
<b>3    KARAKTERISERING AF FORBEHANDLET ORGANISK DAGRENOVATION (BIOMASSE) OG REJEKT</b>	<b>23</b>
3.1    GENNEMFØRTE UNDERSØGELSER	23
3.1.1    Kildesorteringsordninger	23
3.1.2    Forbehandlingsteknologier	24
3.1.3    Undersøgelseernes omfang	24
3.1.4    Prøvetagning og prøvekarakterisering	25
3.1.5    Vurdering af prøvetagnings- og analyseusikkerhed	28
3.2    FORBEHANDLINGSEFFEKTIVITETER	29
3.2.1    Tidsmæssig variation i forbehandlingseffektivitet	29
3.2.2    Forbehandlingseffektiviteter: vådvægt	30
3.2.3    Forbehandlingseffektiviteter: Tørstof og tørstof glødetab	30
3.2.4    Forbehandlingseffektiviteter: Vand	33
3.2.5    Forbehandlingseffektivitet: Sammenfatning	34
3.3    FYSISK KARAKTERISERING	34
3.3.1    Fysisk karakterisering af biomasse	34
3.3.2    Fysisk karakterisering af rejekt	35
3.3.3    Fysisk karakterisering: Sammenfatning	37
3.4    KEMISK KARAKTERISERING	37
3.4.1    Sammensætningen af kildesorteret organisk dagrenovation	38
3.4.2    Tidsmæssig variation i biomassens kemiske sammensætning	41
3.4.3    Forbehandlingens effekt på sammensætning af biomasse og rejekt	43
3.4.4    Forbehandlingens effekt på stoffordelingen mellem biomasse og rejekt	44
3.4.5    Kvaliteten af biomasse	48
3.4.6    Kvaliteten af rejektet	51
3.4.7    Kemisk karakterisering: sammenfatning	52
3.5    METANPOTENTIALE	53
3.5.1    Måling af metanpotentialet	53
3.5.2    Metanpotentiale: Biomasse	56
3.5.3    Metanpotentiale: Rejekt	57

3.5.4	<i>Metanpotentiale: Beregnede og målte værdier</i>	58
3.5.5	<i>Metanpotentiale i kildesorteret organisk dagrenovation</i>	60
3.5.6	<i>Metanpotentiale: sammenfatning</i>	60
3.6	PILOT-BIOGASANLÆG	61
3.6.1	<i>Pilot-biogasanlæg</i>	61
3.6.2	<i>Metanudbytte</i>	62
3.6.3	<i>Afgasset biomasse</i>	63
3.6.4	<i>Korrelation mellem metanudbytte og metanpotentiale</i>	64
3.6.5	<i>Nedbrydningsgrad</i>	65
3.6.6	<i>Metanudbytte: sammenfatning</i>	68
3.7	RELATION MELLEM POTENTIALER, UDBYTTE, VS OG KILDESORTERET ORGANISK DAGRENOVATION	69
<b>4</b>	<b>MILJØVURDERING: ENERGI, DRIVHUSGASSER OG NÆRINGSSTOFFER</b>	<b>71</b>
4.1	INTRODUKTION TIL BEREGNINGSMODEL	71
4.2	DTU-BIOGASMODELLEN	72
4.2.1	<i>Systembeskrivelse</i>	72
4.2.2	<i>Tekniske specifikationer</i>	73
4.2.3	<i>Ressource- og miljøparametre</i>	74
4.3	GENNEMFØRTE BEREGNINGER	74
4.3.1	<i>Geografiske og systemmæssige vurderinger</i>	75
4.3.2	<i>Energiforbrug og -besparelser</i>	75
4.3.3	<i>Teknologiske vurderinger</i>	77
4.4	VURDERING AF USIKKERHEDER VED BEREGNINGERNE	78
4.5	PERSPEKTIVERING	79
<b>5</b>	<b>KONKLUSION</b>	<b>83</b>
5.1	DEN KILDESORTEREDE ORGANISKE DAGRENOVATION	83
5.2	FORBEHANDLING	83
5.3	SAMMENSÆTNING AF BIOMASSE OG REJEKT	84
5.4	METANPOTENTIALET	85
5.5	REALISERBART METANPOTENTIALE: METANUDBYTTE	85
5.6	ENERGI, DRIVHUSGASSER OG NÆRINGSSTOFFER	86
<b>6</b>	<b>REFERENCER</b>	<b>89</b>

### **Bilag:**

Bilag 1: Status for indsamlede mængder kildesorteret organisk dagrenovation medio 2001

Bilag 2: Sammenstilling af danske basisdata for bioforgasning af organisk dagrenovation

Bilag 3: Beregning af biogaspotentiale og brændværdi

Bilag 4: DTU-Biogasmodel: Modeldokumentation, scenarier og resultater

# Forord

Denne rapport er udarbejdet i et samarbejde mellem Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet (Kongens Lyngby, DK), Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Lunds Tekniske Högskola (Lund, Sverige), Rambøll A/S (Virum, DK) og VA-verket/ Malmö Stad (Malmö, Sverige).

Rapport og tilhørende bilag udgør sammen med den tilknyttede rapport ”Datarapport om sammensætning og biogaspotentialer af kildesorteret organisk dagrenovation” af rapporteringen af projektet ”Basisdokumentation for biogaspotentialer i organisk dagrenovation”, der er gennemført i perioden marts 2001 til oktober 2002 under Miljøstyrelsens Program for renere produkter m.v. Projektet har udover finansieringen fra Miljøstyrelsen modtaget støtte fra Malmö Stad via VA-verket og fra en række affaldsaktører i Hovedstadsområdet (Københavns Kommune, Renholdningsselskabet af 1898 (R-98) og Vestforbrænding I/S).

”Datarapport om sammensætning og biogaspotentialer af kildesorteret organisk dagrenovation”, som indeholder det grundlæggende datamateriale for nærværende rapport, er en fælles datarapport med projektet ”Sammenhæng mellem sortering, forbehandling og kvalitet af biomasse”, gennemført af en række rådgivende ingeniørfirmaer (PlanEnergi, Skørping, Cowi, Kolding, Rambøll, Odense), idet de to projekter er gennemført sideløbende og omfatter de samme prøver af kildesorteret organisk dagrenovation.

I projektet har også indgået organisk dagrenovation indsamlet gennem alternative kildesorteringssystemer i Malmö, Sverige. Arbejdet med dette affald er dog af praktiske årsager blevet forsinket og vil blive afleveret selvstændigt.

Styringsgruppen for projektet ”Basisdokumentation for biogaspotentialer i organisk dagrenovation” har været:

Svend-Erik Jepsen, Miljøstyrelsen (Formand)  
Thomas H. Christensen, Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekn. Universitet  
Jes la Cour Jansen, Lunds Tekniske Högskola  
Frank Michael Larsen, COWI  
Henrik Ørtenblad, Energigruppen Jylland A/S  
Søren Tafdrup, Energistyrelsen, Kontoret for Vedvarende Energi  
Bjarne Bro, Grindsted Kommune  
Kjeld Johansen, Jysk Biogas International  
Michael Andersen, Kolding kommune, Renovationsafdelingen  
Niels Remtoft, Kommunernes Landsforening  
Hans Christian Christiansen, Miljøkontrollen, Københavns Kommune  
Anne Sofie Nielsen, Miljøstyrelsen  
Orla Jørgensen, PlanEnergi  
Jens Kjems Toudal, Rambøll, Virum  
Per Haugsted Petersen, Rambøll, Odense  
Martin Hallmer, SYSAV, Malmö, Sverige

Christopher Gruvberger, VA-verket, Malmö, Sverige  
Hardy Gregersen, Vejle kommune  
Thorsten Nord, Aalborg Kommune, Renovationsvæsenet  
Kurt Sørensen, Aalborg Kommune, Renovationsvæsenet

Rapporten er udarbejdet af :

Thomas H. Christensen, Trine Lund Hansen og Janus Kirkeby (Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet), Jes la Cour Jansen og Åsa Svärd (Lunds Tekniska Högskola), Jens Kjems Toudal, Hans W. Rasmussen og Tore Hulgaard (Rambøll, Virum) og Christopher Gruvberger (VA-verket, Malmö).

Konklusioner og vurderinger i nærværende rapport er forfatternes ansvar og udtrykker ikke nødvendigvis de finansierende parters og styringsgruppe-medlemmers synspunkter.

November 2002

Thomas H. Christensen  
Jes la Cour Jansen

# Sammenfatning og konklusioner

Kildesorteret organisk dagrenovation fra fælles og individuelle skraldespande fra kildesorteringsordningerne i Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg er over en 11 måneders periode hver to gange blevet behandlet på forskellige forbehandlingsanlæg: neddeling + magnetseparering, rulsesigte og skrueseparator. I enkelte tilfælde er den tidsmæssige variation belyst med 6 prøver over perioden. Det forbehandlede affald (kaldet biomassen) og rejektet er karakteriseret fysisk og kemisk og metanpotentialet er målt i laboratoriet over 50 døgn. I 14 tilfælde er biomassen blevet bioforgasset på et pilot-biogasanlæg, idet metanudbyttet er bestemt efter stabil drift er opnået. Den afgassede biomasse er endvidere karakteriseret med hensyn til kemisk sammensætning og restmetanpotentiale.

Den kildesorterede organiske dagrenovations sammensætning varierer mellem de undersøgte geografiske områder, men forskellene synes forklarlige ud fra forskelle i kildesorteringsvejledning og i poser anvendt til indsamlingen: Kattegrus, potteplanter og lignende inkluderet i den grønne fraktion synes at øge askeindholdet og anvendelsen af plastposer i indsamlingen øger indholdet af plast, dog også udover den plastmængde, der skyldes selve indsamlingsposerne. I enkelte tilfælde har indholdet af plast været meget højt (>10%). Set i forhold til det organiske stof (målt som glødetab minus plast) er der ingen systematiske forskelle mellem affaldet fra fælles og individuelle skraldespande, fra forskellige kildesorteringsordninger eller fra forskellige indsamlingssystemer. Det bør dog bemærkes at der er væsentlig variation i sammensætningen af det organiske stof.

Af forbehandlingsteknologierne udmærker neddeling + magnetseparering sig ved i alle tilfælde at give de højeste andele af alle parametre i biomassen, idet rejektets vægt er mindre end 1 %. Neddeling + magnetseparering som eneste forbehandling er dog kun mulig på meget rent kildesorteret organisk dagrenovation og har kun kunnet gennemføres for affald fra Grindsted og Hovedstadsområdet. Til sammenligning giver rulsesigten i gennemsnit 34% rejekt og skrueseparatoren 41% målt som vådvægt. Forbehandlingseffektiviteterne varierer betydeligt, med relative standardafvigelser i runde tal på 10-15%. Forskelle i forbehandlingseffektivitet afhængig af geografi, skraldespandssystem og forbehandlingsteknologi har ikke kunnet konstateres. Vigtigst er det at notere, at mængden af tørstof, der forbehandles til biomassen, kan variere væsentligt over tid.

Biomassen fra skrueseparatoren er meget ren om end små plaststumper visuelt kan identificeres, men vægtmæssigt er det meget lidt (skønsmæssigt < 0,5%). Rulsesigten resulterer i mere plast og større stykker papir i biomassen. Rejektet består for begge forbehandlingers vedkommende primært af organisk stof; oftest 90-98 % men undtagelsesvist af kun 80-85% på grund af usædvanligt store plastmængder. Mængden af fremmedlegemer ud over plast er forsvindende (skønsmæssigt < 1%).

Forbehandlingens betydning for biomassens andel af de forskellige komponenter i den kildesorterede organiske dagrenovation varierer væsentligt og afhænger i et vist omfang både af affaldets oprindelse og af

forbehandlingsteknologi. Massemæssigt betragtet er der dog ingen signifikante generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseparatoren med hensyn til at fordele det nedbrydelige organiske stof til biomassen. I runde tal havner 50-55% af alle komponenter i biomassen. For affald fra Hovedstadsområdet og fra Vejle forholder dette sig noget anderledes, idet rullesigten for en række komponenter masse-mæssigt her fordeler mere til biomassen på rullesigten end på skrueseparatoren.

Sammensætningen af biomassen for et givet system (geografi, indsamlingssystem, forbehandling) varierer over tid og variationen er forskellig for forskellige parametre. For de væsentligste parametre er den tidsmæssige variation udtrykt som relativ standardafvigelse 3-15%. Biomassens sammensætning varierer mellem de geografiske områder kun hvad angår askeindholdet, idet askeindholdet er størst i biomasse fra Kolding og Vejle (15,0-16,7%) og mindst i Hovedstads-området (6,5-11,2%) og Grindsted (10,0%). Biomassen består typisk af 22-32% tørstof, 83-93% organisk stof (VS), 10-14% fedt, 13-15% protein, 10-16% stivelse, 4-10% sukker og 16-24% træstof. De målte komponenter udgør i snit 80% af det organiske stof, idet resten beskrives som "andre kulhydrater". De væsentligste forskelle i biomassens sammensætning skyldes forbehandlingen. Generelt kan det siges, at biomasse fra skrueseparator, sammenlignet med biomasse fra rullesigte, indeholder mere vand (relativt 7-20% mindre TS), mere fedt (relativt 10-20% mere), mindre træstof (relativt 22-40% mindre) og mere EFOS (EFOS: Enzym-fordøjeligt organisk stof er 97,3-99,3 % af VS for skrueseparatoren sammenlignet med 87-94% af VS for rullesigten) samt mindre P (relativt 50% lavere).

Målinger af metanpotentialer i laboratoriet over 50 døgn viser, at det organiske stof i biomassen fra forbeholdt kildesorteret organisk dagrenovation i middel har et metanpotentialer på 465 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Målingerne udviser nogen variation, men der er ingen systematiske forskelle mellem geografiske områder, fælles og individuelle skraldespande og ej heller forbehandling. Metanpotentialer beregnet enten ud fra komponentsammensætningen eller ud fra grundstofsammensætningen viser som forventet noget højere værdier end de faktisk målte, men der er ingen korrelation mellem beregnede og målte værdier.

Det organiske stof i rejektet er overordnet set ikke væsentligt forskellig fra det organiske stof i biomassen og udviser også et væsentligt metanpotentialer, på VS-basis dog 25-40% mindre end potentialer i biomassen.

Metanudbyttet for biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation bestemt for 14 prøver ved bioforgasning i pilot-biogasanlæg varierede i det væsentlige mellem 300- 400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, med et gennemsnit på 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS og et metanindhold på 62%. Variationen kan ikke henføres til forskelle i geografisk område, fælles og individuelle skraldespande og ej heller til forbehandlingsteknologien. De målte metanudbytter korrelerede ikke med målte biogaspotentialer og heller ikke på brugbar måde med beregnede biogaspotentialer. Nedbrydningsgraden i pilot-biogasanlægget var 74 - 89 % af VS-indholdet i biomassen med et gennemsnit omkring 80%. Den afgassede biomasse har et potentialer for yderligere at danne 40-50 Nml CH<sub>4</sub>/g VS oprindeligt tilført pilot-biogasanlægget svarende til yderligere 10-15% metan.

Modelberegninger af besparelser i energi, drivhusgasemission og næringsstoffer er gennemført for kildesorteret organisk dagrenovation for



forskellige scenarier med hensyn til kildesorteringskriterier, indsamlingssystem, forbehandling og bioforgasning samt forbrænding af rejektet. Tilsvarende besparelser er også beregnet for direkte forbrænding af den organiske dagrenovation. I beregningerne indgår transport, procesenergi, energiproduktion samt substitution af kunstgødning.

Energibesparelsen ved bioforgasning af den organiske dagrenovation er den samme om forbehandlingen sker på rullsigte eller skrueseparator og er i øvrigt ikke signifikant forskellig fra forbrænding af den organiske dagrenovation for Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding og Vejle, mens der er en lille fordel (ca. 9%) i Aalborg.

Bioforgasningen af biomassen og forbrændingen af rejektet bidrager stort set med lige stor produktion af energi. Den største samlede energiproduktion fås, når mest tørstof går i rejektet og mest vand i biomassen. Energibesparelsen ved at substituere kunstgødning og energiforbruget til indsamling og transport af affaldet udgør hver for sig kun ca. 10% af energien. Dette indikerer, at optimering af energibesparelsen ved bioforgasning bør fokusere på optimering af gasproduktionen, gasudnyttelsen og forbrændingen af rejektet.

Den samlede energibesparelse er meget robust over for ændringer i det teknologiske system, idet ændringerne i energibesparelsen er lille ved en rejecktængde på 7 % frem for på normalt på 30 – 44 % (+7%), ved en halvering af energiforbruget til indsamling af kildesorteret affald (+5%), ved en øget køreafstand fra 25 km til 150 km til forbehandlingsstedet (-9%) og ved en 13 % forøgelse af biogasproduktion pr. tons (+9%). Dog vil en ændring i det teknologiske system hvad angår energiudnyttelsen have væsentlige konsekvenser, idet et biogasanlæg med en gasmotor, hvor varmen køles væk vil give en reduktion i energibesparelsen på 23 % (-23%).

For drivhusgasserne er besparelsen ens ved bioforgasning og forbrænding for alle de undersøgte scenarier. Dog opnås der ca. 12 % mindre besparelse i drivhusgasemission ved bioforgasning frem for forbrænding i Grindsted. Dette skyldes udslip af metan.

Besparelsen i N, P og K forekommer ikke ved forbrænding og er pr. ton våd kildesorteret organisk dagrenovation ca. 5-7 kg N, 0,5-1 kg P og 1,5-2 kg K for Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg. I Grindsted, hvor affaldet er meget rent og kun forbehandles ved neddeling og magnetseparering er besparelse pr. ton knap 100% større, da rejecktængden her er forsvindende.

Der er i undersøgelserne konstateret store lokale og tidsmæssige variationer både i affaldets sammensætning, forbehandlings effektivitet, i metanpotentialer og delvist også i pilot-biogasanlæggets metanudbytte. Men da projektet har omfattet mange prøvetagninger, karakteriseringer og forsøg vurderes det, at de gennemførte gennemsnitsbetragtninger bygger på et godt grundlag og derfor på rimelig vis repræsenterer danske forhold hvad angår bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation.



# Summary and conclusions

Source separated organic household waste from multi-family and single-family residential areas in 5 Danish towns and cities (Grindsted, Copenhagen, Kolding, Vejle and Aalborg) was sampled twice during an 11-month long period and pretreated by different mechanical technologies: magnetic separator, disc screen and screw separator. In addition, the seasonal variations have been monitored by six samplings in selected residential areas. The pretreated organic waste (called biomass) and the reject have been characterized physically and chemically, and the biochemical methane potential measured in the laboratory during 50 days. Furthermore, 14 of the biomass samples were anaerobically digested in a pilot-scale digester and the methane yield determined in each case after stable digestion was obtained. The digested biomass was afterwards characterized in terms of chemical composition and residual methane potential.

The composition of the source separated organic household waste varied among the residential areas investigated. The compositional variations seemed to correlate with the sorting criteria applied and the type of collection bag used: Cat soil, potted ornamental plants and alike included in the organic sorting criteria correlated with increased non-volatile solids (ash), and the use of plastic bags for collection of the organic fraction increased the plastic content of the organic fraction in excess of the contribution by the actual collection bags. In a few cases the plastic content was very high (>10%). Considering the actual organic waste in the source separated waste (determined as loss on ignition minus the plastic content) no systematic differences were observed between multi-family and single-family sources, between different sorting criteria, or between different collection systems. However, it should be noted that substantial variation in the composition might have masked minor systematic differences.

Among the pretreatment technologies, the magnetic separator in all cases transferred the largest fraction of all parameters to the biomass, since the reject made up only 1% of the mass. Pretreatment by magnetic separator, however, is only feasible if the source separated organic waste is very clean, as was the case for waste collected in Grindsted and Copenhagen. In contrast to the low reject fraction by the magnetic separator, the reject was 34% for the disc screen and 41% for the screw separator based on wet weight. The pretreatment efficiencies varied significantly revealing a relative standard deviation of 10-15%. No systematic differences in pretreatment efficiency were observed with respect to residential area or waste collection system. However, it is important to note that the fraction of dry weight in the biomass varied substantially in time.

The biomass yielded by the screw separator was very clean although small pieces of plastic still could be identified. By weight, however, the plastic content was < 0.5%. The disc screen caused more plastic and larger pieces of paper in the biomass. The reject consisted in both cases primarily of organic matter, typically 90-98 %, although occasionally only 80-85% when the plastic content was high. Other objects in the biomass constituted less than 1%.

The effect of the pretreatment technology varied substantially as to how much of a constituent in the organic waste was transferred to the biomass. This variation was partly related to the waste composition and partly to the pretreatment technology. However, no systematic difference between disc screen and screw separator was found with respect to the mass of degradable organic waste in the biomass. In average about 50-55% of all components were recovered in the biomass. However, in the case of waste from Copenhagen and Vejle, the disc screen distributed more of several components to the biomass than was the case for the screw separator.

The composition of the biomass for a defined system (residential area, collection system, pretreatment technology) varied in time depending on the parameter in question. For the most important parameters the relative standard deviation was 3-15%. Only the ash content of the biomass varied among the residential areas, being highest in Kolding and Vejle (15.0-16.7%) and lowest in Copenhagen (6.5-11.2%) and Grindsted (10.0%). The biomass consists of 22-32% dry matter, 83-93% organic matter (VS), 10-14% crude fat, 13-15% crude protein, 10-16% starch, 4-10% sugars and 16-24% crude fiber. The measured components make up in average 80% of the organic matter, and it is assumed that remaining part is "other carbohydrates". The main factor affecting the biomass composition is the pretreatment. In general, the biomass from the hydraulic separator, compared to the biomass from the disc screen, contains more water (relatively 7-20% less dry matter, TS), more crude fat (relatively 10-20% more), less crude fiber (relatively 22-40% less) and more EDOM (EDOM: Enzyme-degradable-organic-matter, constitutes 97-99 % of VS for the screw separator compared to 87-94% of VS for the disc screen) and finally less P (relatively 50% less).

The biochemical methane potential determined over 50 days for the organic household waste in the biomass was in average 465 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. The determinations revealed some variation, but no systematic differences between residential areas, between multi-family and single-family sources, nor between the different pretreatment methods were found. Methane potentials calculated on the basis of the components or the chemical composition gave, as expected, higher values than the actually measured potentials, but no correlation was found between theoretical values and measured values.

The organic matter in the reject is fundamentally not different from the organic matter in the biomass and did also reveal substantial methane potential, although based on VS, about 25-40% less than the potential in the biomass.

The methane yield of biomass from source separated organic household waste was for 14 samples measured in a pilot-scale digester. The methane yields measured were 300-400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, averaging 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS and the biogas containing 62% methane. The variation observed was not systematic and no correlation was found with methane potentials measured in the laboratory or with theoretically estimated potentials. The degradation in the digester was 74 - 89 % with respect to VS in the biomass, averaging about 80%. The digested biomass has a potential for additional 40-50 Nml CH<sub>4</sub>/g VS originally supplied to the pilot-scale digester corresponding to in average 10-15% additional methane.

Savings in energy, global warming potential and nutrient recovery from source separated organic household waste were modelled for a range of

scenarios with different sorting criteria, collection system, pretreatment, digesters and including incineration of the reject. Models were also made considering only incineration of the organic waste. Transport, process energy, energy production as well as substitution of artificial fertilizers are considered in the models.

Savings in energy by digestion of the organic household waste is independent of the pretreatment technology and in general not very different from the savings obtained by incineration of the organic household waste from Grindsted, Copenhagen, Kolding and Vejle, while there is a minor advantage (ca. 9%) in the case of waste from Aalborg.

The digestion of the biomass and the incineration of the reject contribute equally to the production of energy when both systems are operated with power and heat production. The largest saving in energy is obtained when the dry matter is recovered in the reject and the water in the biomass. The savings in energy by substituting artificial fertilizer and the energy used on collection and transport of the waste each corresponds to about 10% of the energy obtained in the system. This suggests that optimisation of the energy savings by digestion of organic waste should focus on optimising the gas production in the digester, the gas utilization and the incineration of the reject.

The overall saving in energy is not very sensitive to changes in the technological system: + 7 % energy is obtained if the reject constitutes 7 % instead of usually 30 – 44 %, +5% energy is obtained if no extra fuel is used by having separate collection, -9% energy is obtained if the hauling distance to the digester is increased from 25 km to 150 km, and +9% energy is obtained by a 13 % increase in the biogas production. The crucial issue is in all cases that efficient energy savings require that both electricity and heat are produced: If the gas engine produces only electricity and the heat is not utilized, then the energy savings are reduced by 23 %.

Recovery of N, P and K does not exist by incineration, but by digestion each ton of wet source separated organic household waste contributes with 5-7 kg N, 0.5-1 kg P and 1.5-2 kg K for most of the systems applicable to Copenhagen, Kolding, Vejle and Aalborg. In Grindsted, where the waste is very clean and a magnetic separator is the only pretreatment, about twice as much is recovered in terms of nutrients, since the reject is negligible.

The investigation revealed large geographical and seasonal variations in waste composition, pretreatment efficiencies, methane potentials and in methane yields. However, the large number of samples involved and the extensive characterization performed suggest that the evaluations and conclusions made reasonably well represent typical Danish conditions regarding source separation and digestion of organic household waste.



# Indledning

Denne rapport er primært en teknisk opgørelse af, hvor meget næringsstof der kan genanvendes, og hvor meget energi der kan spares, ved kildesortering og bioforgasning af organisk dagrenovation.

## 1.1 Undersøgelsens baggrund

I Danmark er der i de senere år blevet igangsat en række projekter med henblik på at etablere det faglige og økonomiske grundlag for en eventuel gennemførelse af kildesortering og bioforgasning af organisk dagrenovation. Grundlaget er et teknisk system, hvor den kildesorterede organiske dagrenovation forbehandles med henblik på at forbedre dets kvalitet, inden det bioforgasses, oftest i biogassfællesanlæg som primært baserer sig på gylle og industrielt affald. Det afgassede materiale afsættes via de etablerede systemer til jordbrugsanvendelse, mens rejektet fra forbehandlingen tilføres et forbrændingsanlæg. Ideen er, at dette system både genanvender næringsstofferne i affaldet og producerer energi, dels ved udnyttelse af biogassen, dels ved forbrænding af rejektet. Centrale spørgsmål i denne sammenhæng er, hvor meget næringsstof der genanvendes, og hvor meget biogas der kan udvindes af kildesorteret organisk dagrenovation. Udnyttelsen af biogassen har betydning for besparelse af både primærenergi og emissionen af drivhusgasser.

Kildesorteringsordningerne for organisk dagrenovation, hvor af nogle er permanente og andre er forsøg i stor skala, varierer med hensyn til indsamlingssystemet samt mængder og kvalitet af det indsamlede materiale. Kriterierne for kildesorteringen varierer kun lidt fra ordning til ordning, men karakteren og omfanget af information til beboerne kan variere væsentligt. Indsamlingssystemerne varierer med hensyn til, hvilken type pose der benyttes til opsamlingen i køkkenet (papir/plast), indsamlingsmateriellet (sæk/plastbeholder) samt frekvensen for indsamlingen (hver uge/hver anden uge). Mængden og kvaliteten af den indsamlede organiske dagrenovation vil, udover den potentielle mængde til stede, afhænge af beboernes indsats, som igen vil afhænge af sociale forhold, miljøbevidsthed, plads i køkkenet, sanktionsmuligheder samt informationsmaterialet fra kommunen. Der kan således potentielt være forskelle mellem kildesorteringsordningernes funktion både med hensyn til geografisk område og boligtype (fælles eller individuel opsamlingsordning).

Forbehandling af den kildesorterede organiske dagrenovation indgår i alle eksisterende tekniske systemer. De væsentligste metoder er rullsigte, skrueseparator og en kombineret neddeling og magnetseparering. De tekniske udformninger kan dog variere betydeligt. Både rullsigten og skrueseparatoren resulterer i væsentlige mængder rejekt, som typisk tilføres et forbrændingsanlæg, mens neddeling og magnetseparering kun giver en lille rejktmængde, især bestående af jern med vedhængende materialer. På selve biogasanlægget kan der ske både yderligere forbehandling og efterbehandling af affaldet.

Bioforgasningen sker i det væsentligste i blanding med andet affald og gylle. Bioforgasningen sker typisk enten ved 35°C (mesofilt) eller ved 50-56°C (termofilt) og opholdstiderne varierer fra 14 til 20 døgn (længst ved mesofile processer). I nogle systemer efterafgasser affaldet i lukkede tanke og biogassen opsamles, mens andre systemer opbevarer det afgassede materiale i gyllebeholdere eller i lagertanke hos den enkelte landmand. Biogassen opsamlet på biogasanlægget udnyttes enten til opvarmning, el-produktion eller til begge formål. På de danske biogasanlæg udgør den kildesorterede organiske dagrenovation kun nogle få procent af det affald, der tilføres, og det har derfor ikke været muligt at dokumentere, hvor meget biogas der produceres af den kildesorterede organiske dagrenovation i fuld skala ved normal drift.

## 1.2 Undersøgelsens formål og indhold

Nærværende undersøgelses overordnede formål er at etablere den grundliggende dokumentation for, hvor meget næringsstof der genindvindes og hvor meget energi der spares ved bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation afhængig af, hvilket system der benyttes. Undersøgelsen tager udgangspunkt i eksisterende danske kildesorteringsordninger og fokuserer på den kildesorterede organiske dagrenovation efter indsamling, idet aspekterne omkring indsamlingssystemernes indretning, organiseringen og de indsamlede mængder belyses i andre projekter.

Undersøgelsens formål er defineret som:

- En kritisk gennemgang af det pr. år 2000 eksisterende danske datagrundlag vedrørende rapporterede mængder af indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation samt mængden af biogas og kvaliteten af det afgassede materialer fra danske biogasanlæg, hvad angår kildesorteret organisk dagrenovation
- Prøvetagning og måling af kvalitet samt biogaspotentiale af kildesorteret organisk dagrenovation fra forskellige kildesorteringsordninger og forbehandlingssystemer
- Vurdering af mængden af genvundne næringsstoffer samt de energimæssige besparelser, udtrykt i primærenergi og drivhusgasemissioner, der opnås ved forskellige kildesorteringssystemer med forbehandling og bioforgasning af organisk dagrenovation

Prøvetagning og måling af kvalitet samt biogaspotentiale af kildesorteret organisk dagrenovation udgør langt den største aktivitet i projektet. Ved samarbejdet med projektet "*Sammenhæng mellem sortering, forbehandling og kvalitet af biomasse*" /2/ blev det muligt, hvad angår prøvetagningen, at opnå prøver fra forskellige kildesorteringsordninger behandlet på forskellige forbehandlingsanlæg, således at følgende forskelle og effekter kan belyses:

- Effekt af affaldets geografiske oprindelse, idet der er undersøgt affald fra Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg
- Effekt af boligtype, idet områder med individuelle og fælles skraldespande er undersøgt separat
- Effekt af forbehandling, idet affald fra samme område blev behandlet på forskellige forbehandlingsanlæg: rullesigte, skrueseparator og neddeling + magnetseparering



- Effekt af variationer over året, idet prøver af samme type blev udtaget og undersøgt flere gange fordelt over året

Ideelt skulle alle ovenstående effekter kunne belyses og kvantificeres gennem en forsøgsplan baseret på statistisk forsøgsplanlægning, hvor udvalget af prøver var bestemt af behovet for data. Men hvis alle kombinationer af ovenstående effekter skulle undersøges ville prøvetagnings- og undersøgelsesprogrammet få et meget stort omfang, der hverken økonomisk eller teknisk kunne realiseres. Samtidig er det ikke alle kombinationer af indsamlings- og forbehandlingsordninger der rent teknisk og praktisk kunne gennemføres. Den gennemførte forsøgsplan er derfor et kompromis mellem faglige ønsker, økonomi og praktiske forhold.

De indsamlede prøver, som omfatter både den forbehandlede kildesorterede organiske dagrenovation og rejektet fra forbehandlingen, blev underkastet omfattende kemisk analyse med henblik på at identificere eventuelle forskelle og etablere et grundlag for at kunne beregne biogaspotentialt. Biogaspotentialt blev ligeledes for en stor del af prøverne målt i laboratoriet og en del af prøverne blev endvidere bioforgasset på et kontinuert pilot-skala anlæg på VA-verket i Malmö.

Som supplement til prøverne fra de danske kildesorteringsordninger indgik også prøver fra kildesorteret svensk dagrenovation omfattende to systemer, som bygger på helt andre tekniske løsninger; dels et system hvor den poseindpakkede organiske dagrenovation indsamles gennem et centralsug og efterfølgende behandles i stempelseparator inden bioforgasning med spildevandsslam, dels et system hvor det organiske affald bortskaffes gennem en køkkenkværn. Affaldet opsamles her separat i et lokalt sedimentationsbassin, mens vandet ledes til kloakken. De to systemer blev først funktionsdygtige i slutningen af projektperioden og indgår kun i begrænset omfang i undersøgelsen. Materialet om disse undersøgelser afrapporteres separat.

### 1.3 Rapportens opbygning

Rapporten sammenfatter de gennemførte undersøgelser, idet centrale data, vurderinger og konklusioner præsenteres: Efter denne indledning (kapitel 1) gennemgås status for vidensgrundlaget år 2000 (kapitel 2), efterfølgende (kapitel 3) beskrives de gennemførte forsøg og resultaterne præsenteres med hensyn til forbehandlingseffektiviteter, fysisk og kemisk karakterisering af prøverne, biogaspotentialer samt realiserede biogasmængder i pilot-skala forsøgene. Den gennemførte vurdering af næringsstoffgenvidningen samt energibesparelserne beskrives i kapitel 4 og konklusionerne drages i kapitel 5. Rapporten indeholder en række bilag hvad angår danske erfaringer med indsamling af kildesorteret organisk dagrenovation (bilag 1), danske erfaringer med bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation (bilag 2), metoder til beregning af biogaspotentialer og brændværdier af affald (bilag 3) og en beskrivelse af den opstillede excell-baserede beregningsmodel samt de gennemregnede scenarier (bilag 4).

De grundlæggende data hvad angår kildesorteringsordningerne, forbehandlingen, prøvekarakteriseringen og biogaspotentialerne er præsenteret i ”*Datarapport om sammensætning og biogaspotentialer af kildesorteret organisk dagrenovation*”, i det følgende refereret til som /1/.



## 2 Status år 2000

Som indledning til de tekniske undersøgelser af sammensætningen og biogaspotentialer af kildesorteret organisk dagrenovation blev der foretaget en gennemgang af rapporterede danske erfaringer vedrørende mængder af kildesorteret organisk dagrenovation til bioforgasning, bilag 1 og en gennemgang af rapporterede danske data om bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation, bilag 2. Formålet var at sammenfatte de hidtidige danske data om, hvor meget kildesorteret organisk dagrenovation der kan indsamles pr. person, hvor meget biogas der kan forventes pr. ton kildesorteret organisk dagrenovation samt mængde og kvalitet af restprodukter fra bioforgasning.

### 2.1 Danske erfaringer om indsamlede mængder af kildesorteret organisk dagrenovation

Indsamling af kildesorteret organisk dagrenovation til bioforgasning i permanente ordninger skete i år 2000 kun i Grindsted (bioforgasning i renseanlæggets rådnetank), Herning (bioforgasning på biogafællesanlægget Studsgård) og Aalborg (begrænset frivillig ordning til separat bioforgasning på forsøgsanlæg, nu i Vaarst-Fjellerad). Omfanget af undersøgelsen blev derfor udvidet til også at omfatte kommuner/anlæg, som indsamler/har indsamlet organisk dagrenovation med henblik på kompostering, og undersøgelsen blev udformet som en spørgeskemaundersøgelse til følgende kommuner/anlæg:

- AFAV I/S, Frederikssund, for interessentkommunerne (oprindeligt kompost, nu biogas)
- Grindsted kommune (biogas)
- Herning kommune (biogas)
- NOVEREN I/S, Audebo, for interessentkommunerne (oprindeligt kompost, nu biogas)
- Vejle kommune (kompost)
- Aalborg kommune (biogas)
- Århus kommune (kompost, fra medio 2001 biogas)

I alt er 5 kommuner og 2 affaldsselskaber med i alt 15 kommuner medtaget i undersøgelsen. Dette svarer til et befolkningsunderlag i indsamlingsområderne på ca. 335000 personer (2000).

Der er en stor variationsbredde i de indsamlede mængder, fra ca. 35 til ca. 110 kg pr. person og år i de forskellige kommuner. Selv i kommuner, som hører under samme selskab og derfor har ens kildesorteringsvejledning, var spredningen på en faktor 2.

Der kunne ikke konstateres nogen entydig sammenhæng mellem kildesorteringsvejledning og mængde indsamlet. Det kunne heller ikke entydigt fastslås, at der indsamles større mængder til kompostering end til bioforgasning, selvom kildesorteringsvejledningerne i flere tilfælde tillader flere fraktioner, f.eks. kattegrus og bleer, i den organiske fraktion, der skal komposteres.

Ud fra de foreliggende data er det i /3/ vurderet, at det er muligt at indsamle omkring 90 kg organisk affald pr. person og år til bioforgasning i mindre kommuner, hvor der gøres en stor indsats for information og opfølgning. I større byområder tyder datamaterialet på, at der til bioforgasning kan indsamles omkring 60 kg organisk affald pr. person og år.

## 2.2 Danske data om bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation

Sammenstillingen af danske data vedrørende biogasmængder samt mængde og kvalitet af restprodukter fra bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovationer er baseret på alle rapporterede undersøgelser op til april 2001 og omfatter følgende pilot- og fuldskala anlæg:

- Forsøgsanlæg på Biogasfællesanlæg i Sinding, Herning.
- Fuldskalaanlæg på Biogasfællesanlæg i Sinding-Ørre, Herning.
- Fuldskalaanlæg på Biogasfællesanlæg i Studsgård, Herning.
- Fuldskalaanlæg på Grindsted Renseanlæg.
- Forsøgsanlæg på Vegger Biogasanlæg
- Nordsjællands Biogasanlæg, Helsingør
- Forsøgsanlæg på Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, 1998.
- Forsøgsanlæg på Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, 1999.
- Forsøgsanlæg på Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, 2000.

Århus Nord Biogasanlæg, Århus og Nysted Biogasfællesanlæg indgår ikke i sammenstillingen. Århus Nord Biogasanlæg var under indkøring og Nysted Biogasfællesanlæg har i 1999 og 2000 modtaget mindre mængder forkomposteret og forbehandlet organisk dagrenovation fra AFAV, men erfaringerne herfra er ikke offentliggjort.

Sammenstillingen viser, at der kun er rapporteret driftsdata fra tre anlæg i normal drift, medens øvrige rapporter vedrører korterevarende undersøgelser enten i forsøgsanlæg eller i eksisterende biogasfællesanlæg, der har været drevet med organisk dagrenovation i en kortere periode. De gennemførte undersøgelser viser, at der har foregået et betydeligt udviklingsarbejde omkring bioforgasning af dagrenovation i Danmark; men i forbindelse med undersøgelserne har hovedvægten været lagt på teknologiudvikling og – afprøvning, således at der kun er etableret begrænset dokumentation for biogaspotentialet i organisk affald som funktion af kildesorteringskriterier, forbehandling og procesbetingelser ved bioforgasningen, ligesom viden om affaldets betydning for kvaliteten af restprodukterne er begrænset. Der er således ikke rapporteret undersøgelser med behandling af organisk dagrenovation i teknisk eller fuld skala, der er planlagt og gennemført således, at de fremkomne data giver en veldokumenteret og sikker bestemmelse af det opnåede gasudbytte fra organisk dagrenovation.

I undersøgelserne er der anvendt kildesorteret dagrenovation fra mange forskellige indsamlingsordninger med betydelige forskelle i kildesorteringsvejledning og kvalitet af det indsamlede affald. Derudover er der anvendt flere forskellige typer forbehandling af affaldet inden bioforgasning. Det er ikke muligt at knytte de opnåede resultater entydigt sammen med kildesorteringsvejledning, indsamlingssystem og effekten af forbehandlingsanlægget.

Gasudbytter for kildesorteret organisk dagrenovation må på baggrund af sammenstillingen anses for usikkert bestemt; men skønnes for forbehandlet affald at ligge i området 110-180 Nm<sup>3</sup>/ton affald med et metanindhold på ca. 65% (70-115 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton forbehandlet affald), svarende til typisk 100-120 Nm<sup>3</sup>/ton indsamlet affald. Der findes dog indsamlingsordninger, hvor forbehandlingen kun fjerner en meget lille del af det kildesorterede affald (f.eks. i Grindsted), således at gasudbyttet baseret på det indsamlede affald stort set svarer til udbyttet efter forbehandlingen. I gennemgangen er endvidere medtaget 2 danske laboratorieundersøgelser udført med organisk dagrenovation. Undersøgelserne viste et biogaspotential på 350-550 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton omsat affald målt som VS (glødetab).

Den kildesorterede organiske dagrenovation har er i stort set alle undersøgelser været bioforgasset med anden biomasse. Det er derfor vanskeligt at bedømme bidraget fra den kildesorterede organiske dagrenovation til den endelige kvalitet af restprodukterne. Fokus har i de fleste undersøgelser været at dokumentere, at restprodukterne uden problemer kunne overholde gældende krav til jordbrugsanvendelsen, og mindre på bidraget af næringsstoffer fra det forbehandlede kildesorterede organiske dagrenovation.

Kravene til restprodukter fra bioforgasning, der ønskes anvendt i jordbruget, er ændret og skærpet flere gange i de sidste 10 år. Der er løbende sket stramninger for en række tungmetaller og stillet krav til nye. Der er indført krav til indholdet af miljøfremmede organiske stoffer. Endelig er der flere gange foretaget ændringer af, hvor i processen kontrollen skal ske. Fokus er flyttet fra de restprodukter, der anvendes i jordbruget, til sikring af, at der ikke i affaldsbehandlingen tilføres affald (herunder kildesorteret organisk dagrenovation) med forhøjet indhold af problemstoffer. Således kan de tidligere undersøgelser kun i mindre omfang benyttes til at bedømme, om kildesorteret organisk dagrenovation vil kunne overholde de gældende krav.

Undersøgelsesresultater tyder dog på, at kun affaldets indhold af plastblødgøreren DEHP er så højt, at det kan forventes lejlighedsvis at give problemer med overholdelse af dagens krav til jordbrugsanvendelse af restprodukterne.



# 3 Karakterisering af forbehandlet organisk dagrenovation (biomasse) og rejekt

Dette kapitel beskriver de gennemførte forsøg med prøvetagning af kildesorteret organisk dagrenovation, fysisk og kemisk karakterisering af forbehandlet kildesorteret organisk dagrenovation (biomasse) og rejekt samt målingerne af biogaspotentialet i laboratorieforsøg og bioforgasningsforsøg i pilot-skala.

## 3.1 Gennemførte undersøgelser

De gennemførte undersøgelser beskrives kort med hensyn til hvilke kildesorteringsordninger og forbehandlingsteknologier, der indgår. Endvidere beskrives undersøgelsens omfang samt prøvetagnings- og oparbejdningsprocedurer.

### 3.1.1 Kildesorteringsordninger

Kildesorteret organisk dagrenovation fra følgende ordninger, der er nærmere beskrevet i /1/ og /2/, indgår i undersøgelsen:

**Grindsted.** Grindsted Kommunes kildesorteringsordning er permanent og omfatter ca. 6050 boliger med individuelle skraldespande. I denne undersøgelse er benyttet affald indsamlet fra områder med individuelle skraldespande (I). Organisk dagrenovation kildesorteres i særlige papirposer og opsamles udendørs i papirsække, der indsamles separat hver 14. dag. Kommunen yder en stor informationsindsats og kontrollerer løbende indsamlingskvaliteten.

**Hovedstadsområdet.** Kildesorteringsforsøget i Hovedstadsområdet foregår i flere distrikter og kommuner og omfatter ca. 2450 boliger med individuelle skraldespande (I) og 13950 boliger med fælles skraldespande (F). En del af etageboligerne på Amager, som indgår i dette forsøg, har haft forsøg kørende gennem mange år. Organisk dagrenovation kildesorteres i særlige papirposer og opsamles udendørs i papirsække, biokurve eller plastbeholdere afhængig af området. Indsamlingen sker hver 7. eller 14. dag afhængig af område. Affaldet omlastes til 30 m<sup>3</sup> containere, der transporteres til forbehandlingsanlægget når de er fyldte.

**Kolding.** Kildesorteringsforsøget i Kolding foregår i flere distrikter og omfatter ca. 1600 boliger med individuelle skraldespande (I) og 400 boliger med fælles skraldespande (F). Organisk dagrenovation kildesorteres i særlige plastposer og opsamles udendørs i papirsække, der indsamles hver 14. dag. Affaldet centralkomposteres.

**Vejle.** Kildesorteringsordningen i Vejle er permanent foregår i flere distrikter og omfatter ca. 12650 boliger med individuelle skraldespande (I) og 13700 boliger med fælles skraldespande (F). Organisk dagrenovation kildesorteres i

særlige plastposer og opsamles udendørs i plastbeholdere sammen med restaffaldet. Indsamling sker hver 7. dag. Affaldet transporteres til et optisk sorteringsanlæg og den organiske dagrenovation komposteres.

**Aalborg.** Kildesorteringsforsøget i Aalborg foregår i 3 distrikter, hvor deltagerne frivilligt har tilsluttet sig ordningen. Forsøget, der har kørt siden 1990 omfatter ca. 650 boliger med individuelle skraldespande (I) og 1650 boliger med fælles skraldespande (F). Organisk dagrenovation kildesorteres i særlige plastposer og opsamles udendørs i plastbeholdere, der indsamles hver 7. eller 14. dag. Affaldet køres til forbehandling med skrueseparator og efterfølgende bioforgasning på Vaarst-Fjellerad Biogasanlæg.

### 3.1.2 Forbehandlingsteknologier

Forbehandling af den kildesorterede organiske dagrenovation har til formål at forberede det organiske affald til bioforgasningsprocessen, hvilket især indebærer fjernelse af plast og andre fremmedlegemer samt neddeling af affaldet. Følgende forbehandlingsteknologier, som er nærmere beskrevet i /1/, indgår i undersøgelsen:

**Rullesigte.** På Knudmoseværket i Herning forbehandles kildesorteret organisk dagrenovation ved en grovneddeling, som åbner affaldsposerne, og efterfølgende rullesigtning. En rullesigte består af rækker af roterende skiver, hvorigennem findelt affald sigtes mens større dele i affaldet, for eksempel poser, ruller af sigten som rejekt.

**Skrueseparator.** På biogasanlægget i Vaarst-Fjellerad ved Aalborg forbehandles kildesorteret organisk dagrenovation i en dobbelt skrueblander, som åbner affaldsposerne og grovneddeler affaldet, som efterfølgende behandles i en skrueseparator. En skrueseparator består af et lamelkammer, hvorigennem det organiske affald presses ud mellem lamellerne som en grød, mens rejektet presses ud gennem en dyse.

**Neddeling og magnetseparering.** På biogasanlægget i Grindsted forbehandles kildesorteret organisk dagrenovation ved neddeling i en shredder og ved efterfølgende magnetseparering. Rejektet består af magnetisk metal plus vedhængende materiale.

### 3.1.3 Undersøgelsernes omfang

Den kildesorterede organiske dagrenovation er karakteriseret efter forbehandlingen idet den forbehandlede dagrenovation til bioforgasning (kaldet biomasse) og rejktet er karakteriseret hver for sig. I en række af de involverede ordninger indsamles kun et enkelt læs om ugen, hvilket begrænsede prøvetagningsmulighederne. Der blev af praktiske grunde kun udtaget prøver efter forbehandlingen, idet der dog som kontrol blev foretaget vejning af det kildesorterede organiske affald inden forbehandlingen ligesom både biomasse og rejekt blev vejnet.

Undersøgelserne omfatter fysisk og kemisk karakterisering af biomasse og rejekt, måling af biogaspotentialer i laboratoriet samt måling af realiserbart biogaspotentialer i pilot-skala forsøg. Omfanget af undersøgelserne er gradueret med henblik på at opnå den bedste udnyttelse af til rådighed værende ressourcer. I alt er der udført 58 karakteriseringer af biomasse, 33 karakteriseringer af rejekt, 57 biogaspotentialmålinger, 17 pilot-skala



bioforgasningsforsøg samt 12 karakteriseringer af afgasset materiale, inklusiv forsøgene med alternative ordninger i Malmø.

Tabel 3.1.1 viser de udførte undersøgelser opdelt efter geografisk område og forbehandlingsmetode. For de fleste mulige kombinationer af geografisk område, boligtype (fælles / individuel skraldespand) og forbehandlingsteknologi er der karakteriseret 2 prøver udtaget på forskellig tidspunkt fordelt over den samlede forsøgsperiode fra maj 2001 til maj 2002. Herudover er der for 3 af ordningerne udtaget supplerende prøver af biomassen, således at der for hver af disse haves 5-6 prøver, der belyser variationen over tid.

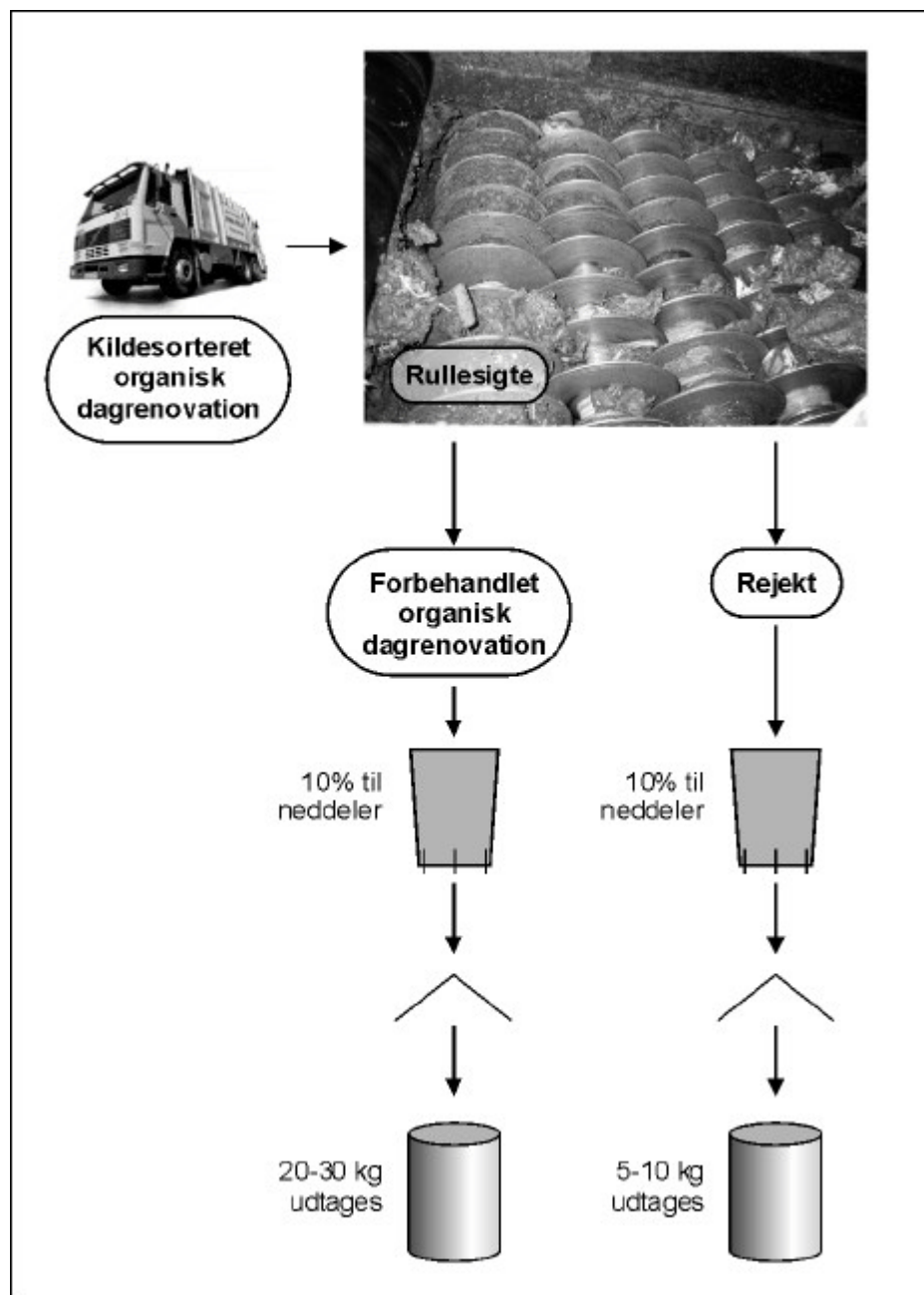
Tabel 3.1.1: Oversigt over gennemførte undersøgelser med angivelse af kildesorteringsordningen (Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg), forbehandlingsmetode (rullesigte, skrueseparator og neddeling + magnet) og antal analyser (analyse), metanpotentialemålinger (CH<sub>4</sub>-pot.) og pilotskalabioforgasning (pilot-biogas.) for henholdsvis fælles (F) og individuelle (I) skraldespande.

	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>	<b>Neddeling + magnet</b>
<b>Grindsted</b>	-	-	I: 5 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas.
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 6 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas. I: 6 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 2 pilot-biogas.	F: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. - I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas.	F: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. - I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. -
<b>Kolding</b>	F: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas. I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 2 pilot-biogas.	F: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. - I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. -	-
<b>Vejle</b>	F: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas. I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. -	F: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas. I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. -	-
<b>Aalborg</b>	F: 1 analyse 1 CH <sub>4</sub> -pot. - I: 2 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas.	F: 6 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 1 pilot-biogas. I: 5 analyse 2 CH <sub>4</sub> -pot. 2 pilot-biogas.	-

### 3.1.4 Prøvetagning og prøvekarakterisering

Et læs kildesorteret organisk dagrenovation vejer typisk 2-4 tons i indsamlingsskøretøjet, mens den kemiske analyse til karakterisering af læsset for mange analysers vedkommende benytter mindre end 1 gram affald (0,000001 ton). Der findes ikke egentlige standardiserede procedurer for prøvetagning af kildesorteret organisk dagrenovation, hvorfor det har været nødvendigt at udvikle særlige prøvetagningsprocedurer for at sikre størst mulig repræsentativitet af de udførte analyser. Der er i alt udført 58 prøvetagninger, hvorfor prøvetagningsprocedurens praktiske gennemførlighed også har spillet en væsentlig rolle.

Prøvetagningsproceduren afhænger i et vist omfang af forbehandlingsanlæggets princip og konstruktion, som beskrevet i /1/. Figur 3.1-1 viser proceduren benyttet i forbindelse med prøvetagning ved rullesigten. De øvrige procedurer er variationer heraf. Affaldet vejes på brovægten ved ankomsten (bil med og uden affald) og forbehandles på rullesigten. Graven hvori affaldet opbevares inden forbehandlingen samt selve forbehandlingsudstyret er tømt og rimeligt rengjort inden den kildesorterede organiske dagrenovation tilføres. Biomasse og rejekt opsamles i container eller grab afhængig af mængden og vejes inden de hver for sig udtippes på gulv. Herfra opskovles til trillebør fra vilkårlige steder i bunken ca. 20 skovfulde, som vejes på badevægt. Der udtages af flere omgange indtil ca. 10 % af bunken er prøvetaget. Herefter neddeles affaldet to gange i en transportabel shredder og udlægges på presenning på gulvet og blandes omhyggeligt. Herfra udtages ved flere stik med plastfejblad 20-30 kg biomasse eller 5-10 kg rejekt som opbevares i lukket plasttønde. Tønden transporteres til laboratoriet til yderligere oparbejdning.



Figur 3.1-1 Procedure for prøvetagning på rullesigte, Knudmoseværket i Herning

Oparbejdningen af biomasseprøverne i laboratoriet afhænger i et vist omfang af prøvens karakter, som beskrevet i detaljer i /1/. Biomassen neddeles indledningsvis i en industriblender og herfra udtages prøver til tørstofbestemmelse. Herefter tilsættes vand for at øge neddelingseffektiviteten. Affaldet har nu karakter af klumpet grød og heraf prøvetages til fysisk karakterisering og til de kontinuerte pilot-skala bioforgasningsforsøg. Sidstnævnte prøver nedfryses i portioner svarende til en dags forbrug i hver forsøgsreaktor. Fra industriblenderen tages en prøve som efter yderligere vandtilsætning finnedeles i en stavblender. Herfra tages prøver til pH, flygtige syrer (VFA), kvælstofanalyser samt måling af biogaspotential. Den finnedelte prøve tørres ved 80 °C over længere tid og den tørrede prøve neddeles i en hammermølle med et 2 mm sold. Dette pulver benyttes til de øvrige kemiske analyser.

Oparbejdningen af rejektprøverne i laboratoriet omfatter indledningsvist en manuel sortering af prøven i tre fraktioner: Plast, andet (typisk metal) og organisk fraktion. Plasten skylles og tørvægten af plasten og "andet" bestemmes. Det organiske stof følger herefter samme oparbejdningsprocedure som beskrevet for oparbejdning af biomasseprøverne.

Karakteriseringen af biomasseprøver og rejektprøver omfatter, idet der vedrørende metoder henvises til /1/:

DLG Centrallaboratorium, Odense:

Råfedt, råprotein, træstof, stivelse, sukker, enzym-fordøjeligt organisk stof (EFOS)

Alcontrol, Malmø, Sverige:

Total-N, Total-P, kalium, klorid, svovl, kulstof, brint, brændværdi, COD

Lunds Tekniska Högskola, Lund, Sverige:

Fysisk karakterisering

VA-verkets Laboratorium, Malmø, Sverige: Driftsanalyser på pilot-biogasanlægget (pH, VFA, bufferkapacitet, ammonium, gasmængder og sammensætning).

Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby:

Tørstof (TS), glødetab (VS), pH, Kjeldahl-N, ammonium-N, Flygtige syrer (VFA) og biogaspotential.

### 3.1.5 Vurdering af prøvetagnings- og analyseusikkerhed

En vurdering af usikkerheden på prøvetagningen blev gennemført dels hvad angår proceduren ved rullsigten dels hvad angår proceduren ved skrueseparatoren. Undersøgelsen er beskrevet i /1/ og omtales med hensyn til rullsigten kort her.

Undersøgelsen havde til formål at vurdere om enkelte trin i prøvetagningen specielt bidrog til usikkerheden og dermed havde behov for forbedring. Endvidere ønskedes den samlede usikkerhed ved prøvetagningen vurderet. Princippet i undersøgelsen er, at for hvert trin i proceduren foretages der en opsplitning af prøven, hvorved der fremkommer en række parallelle prøver med det samme udgangspunkt. Konceptet hedder i statistikken et "incomplete nested design" eller et "staggered design" og resulterede i denne undersøgelse i 10 parallelle prøver. Prøverne blev analyseret for 15 kemiske parametre og det konstateredes, at der ikke var trin i proceduren som specielt bidrog til

usikkerhed og at den samlede usikkerhed for langt de fleste parametre var mindre end 10 % udtrykt som relativ standardafvigelse. Enkelte parametre som sukker og stivelse udviste dog større usikkerhed (sukker: 16%; stivelse: 33%).

En vurdering af usikkerheden på de kemiske analyser blev gennemført ved for hver analyseserie at inkludere en ikke-genkendbar gentagelsesprøve. Usikkerheden på den kemiske analyse var for de fleste parametre mindre end 10 % (relative standardafvigelse) /1/.

Samlet vurderes, at prøvetagningsproceduren er sund og at de kemiske analyser er pålidelige med en samlet usikkerhed, der i almindelighed ikke overstiger 10 % udtrykt som relativ standardafvigelse.

### 3.2 Forbehandlingseffektiviteter

Affaldet fra de 5 geografiske områder Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg er i forskelligt omfang blevet forbehandlet på de tre forskellige forbehandlingsanlæg: neddeling + magnetseparering i Grindsted, rullerisigten i Herning, og skrueseparatoren i Vaarst-Fjellerad. På basis heraf kan de forskellige forbehandlingsteknologiers effektivitet vurderes.

I dette afsnit vurderes den tidsmæssige variation i forbehandlingseffektiviteterne samt forskelle i forbehandlingseffektivitet med hensyn til den mængdemæssige fordeling i henholdsvis biomasse og rejekt af den kildesorterede organiske dagrenovations vådvægt samt indhold af tørstof (TS) og organisk stof (tørstof glødetab, VS).

Metodebeskrivelser og rådata findes i /1/ og mere detaljerede vurderinger findes i /2/.

#### 3.2.1 Tidsmæssig variation i forbehandlingseffektivitet

Den tidsmæssige variation blev belyst ved at udtage gentagne prøver fordelt over et lille år på systemer, hvor kildesorteret organisk dagrenovation på det tidspunkt forbehandlede rutinemæssigt: Affald fra Grindsted forbehandlet med neddeling og magnetseparering i Grindsted (5 prøver over 8 måneder), affald fra Hovedstads-området forbehandlet med rullerisigte på Knudmoseværket i Herning (6 prøver over 9 måneder) samt affald fra Aalborg forbehandlet med skrueseparator i Vaarst-Fjellerad (5 og 6 prøver over 11 måneder). Resultaterne er sammenfattet i tabel 3.2.1.

Tabel 3.2.1: Biomassens andel af vådvægten (%) af den kildesorterede organiske dagrenovation målt gentagne gange over en 8-11 måneders periode for tre forbehandlingsteknologier: neddeling + magnetseparering for affald fra Grindsted, rullerisigte for affald fra Hovedstadsområdet samt skrueseparator for affald fra Aalborg.

	Grindsted		Hovedstadsområdet		Aalborg	
	Individuel	Fælles	Individuel	Fælles	Individuel	
<b>Prøve 1</b>	100	65	67	60	76	
<b>Prøve 2</b>	100	66	69	55	55	
<b>Prøve 3</b>	100	72	72	67	75	
<b>Prøve 4</b>	100	69	59	51	64	
<b>Prøve 5</b>	100	76	73	57	72	
<b>Prøve 6</b>	100	75	76	69	-	
<b>Middel</b>	100	71	69	60	69	

<b>Rel. Std.afv.</b>	-	7	9	13	13
----------------------	---	---	---	----	----

For Grindsteds vedkommende var rejehtmængden mindre end 1% og blev derfor ikke vejnet systematisk. Følgelig udgør biomassen 100% af vådvægten af den kildesorterede organiske dagrenovation. Både rullerisigten og skrueseparatoren resulterer for det undersøgte affald i gennemsnit i 60-70% af vådvægten i biomassen og følgelig ca. 30-40% i rejeftet. Der observeres nogen variation over tid men en egentlig årstidsvariation kunne ikke observeres. Den relative standardafvigelse er 7-9 % for affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet på rullerisigten og 13% for affald fra Aalborg forbehandlet med skrueseparatoren.

### 3.2.2 Forbehandlingseffektiviteter: vådvægt

På baggrund af vejning af det kildesorterede organiske affald før forbehandlingen og vejning af biomassen ved alle prøvetagninger kan fordelingen mellem biomasse og rejekt bestemmes som funktion af affaldets oprindelse, herunder opdeling på fælles og individuelle skraldespande, og forbehandlingsteknologi. I /1/ foreligger resultater fra i alt 56 prøver fra de 5 geografiske områder. Forbehandlingens effektivitet udtrykkes som biomassens andel i % af vådvægten af den kildesorterede organiske dagrenovation. Tabel 3.2.2 sammenstiller resultaterne opdelt efter geografisk område og forbehandlingsteknologi, idet det på baggrund af en indledende statistisk analyse blev konstateret at der ingen forskel var på resultater for fælles og individuelle skraldespande, uanset forbehandlingsteknologi.

Det fremgår tydeligt af tabel 3.2.2, at der for de undersøgte forbehandlingsteknologier er væsentlig forskel på biomassens andel af det oprindelige organiske affald. Ved forbehandling med neddeling + magnetseparation bliver hele den kildesorterede organiske dagrenovation til biomasse, idet kun en marginal del af affaldet frasorteres i forbehandlingen. Rullerisigten giver i middel ca. 66% biomasse og skrueseparatoren ca. 59%. Forskellen på ca. 7 % mellem rullerisigten og skrueseparatoren er statistisk signifikant (dobbeltsidet t-test).

For kombinationen af geografisk område og forbehandlingsteknologi er den eneste statistisk signifikante (dobbeltsidet t-test) forskel, at affaldet fra Hovedstadsområdet giver mere biomasse end de øvrige affaldstyper, når det forbehandles på rullerisigte. Dette kan skyldes, at der benyttes papirposer til indsamlingen og at der kun er få urenheder i form af plast i affaldet fra Hovedstadsområdet (se senere).

De tre forbehandlingsteknologier har således en klar og statistisk signifikant rangordning med hensyn til biomassens andel af den kildesorterede organiske dagrenovation: Neddeling + magnetseparering giver stort set 100% biomasse, rullerisigten i middel ca. 66% og med højest biomasseandel for affald fra Hovedstadsområdet, mens skrueseparatoren i gennemsnit ligger lavest med ca. 59% biomasse vurderet på basis af vådvægt.

### 3.2.3 Forbehandlingseffektiviteter: Tørstof og tørstof glødetab

Tabel 3.2.3 og tabel 3.2.4 viser forbehandlingseffektiviteterne, det vil sige biomassens andel af den kildesorterede organiske dagrenovation, udtrykt i forhold til tørstof henholdsvis tørstof glødetab (organisk stof + plast). Tallene i tabel 3.2.3 og 3.2.4 er den procentvise del af den kildesorterede organiske dagrenovations indhold af tørstof, der havner i biomassen.

Det fremgår umiddelbart af tabel 3.2.3, at der for forbehandlingsteknologierne for tørstof gælder samme rangorden som for vådvægt: Den højeste forbehandlingseffektivitet findes for forbehandling ved neddeling + magnetseparering (100%), den næsthøjeste for rullesigten (54%) og den laveste for skrueseparatoren (49%). Forskellen mellem rullesigten og skrueseparatoren er imidlertid lille og ikke statistisk signifikant. For kombinationen af geografisk område og forbehandlingsteknologi er den eneste statistisk signifikante forskel (dobbeltsidet t-test), at affaldet fra Hovedstadsområdet giver mere tørstof i biomassen end de øvrige affaldstyper set under et, når det forbehandles på rullesigte. Den samlede analyse af forskellene mellem fælles og individuelle skraldespande viser, at der heller ikke for tørstof er signifikant forskel, hverken på rullesigten eller skrueseparatoren når alle prøver fra samme forbehandlingssystem ses under et.

Tabel 3.2.2: Forbehandlingseffektivitet: Biomassens andel, %, af vådvægt af kildesorteret organisk dagrenovation

	<b>Neddeling+ magnetseparering</b>	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>
<b>Grindsted</b>	Fra tabel 3.2.1 <i>Middel: 100</i>	-	-
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 100 og 100 I: 100 og 100 <i>Middel: 100</i>	Fra tabel 3.2.1 <i>Middel: 70</i>	F: 54 og 54 I: 63 og 52 <i>Middel: 56</i>
<b>Kolding</b>	-	F: 56 og 55 I: 59 og 63 <i>Middel: 58</i>	F: 56 og 77 I: 52 og 63 <i>Middel: 62</i>
<b>Vejle</b>	-	F: 66 og 72 I: 61 og 70 <i>Middel: 67</i>	F: 45 og 63 I: 58 og 58 <i>Middel: 56</i>
<b>Aalborg</b>	-	F: 66 I: 63 og 72 <i>Middel: 67</i>	Fra tabel 3.2.1 <i>Middel: 64</i>
<b>Middel</b>	<i>100</i>	<i>66</i>	<i>59</i>

Tabel 3.2.3: Forbehandlingseffektivitet: Biomassens andel, %, af tørstof af kildesorteret organisk dagrenovation

	<b>Neddeling+ magnetseparering</b>	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>
<b>Grindsted</b>	Forbehandlingen er gennemført 6 gange. <i>Middel: 100</i>	-	-
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 100 og 100 I: 100 og 100 <i>Middel: 100</i>	F: 57 og 63 I: 59 og 70 <i>middel: 62</i>	F: 59 og 48 I: 58 og 44 <i>Middel: 52</i>
<b>Kolding</b>	-	F: 39 og 46 I: 52 og 56 <i>Middel: 48</i>	F: 45 og 71 I: 33 og 56 <i>Middel: 51</i>
<b>Vejle</b>	-	F: 49 og 59 I: 55 og 59 <i>Middel: 56</i>	F: 28 og 59 I: 35 og 47 <i>Middel: 42</i>
<b>Aalborg</b>	-	F: 42 I: 42 og 56 <i>Middel: 47</i>	F: 35 og 42 I: 55 og 62 <i>Middel: 49</i>
<b>Middel</b>	<i>100</i>	<i>54</i>	<i>49</i>

Tabel 3.2.4 viser i det væsentlige de samme forskelle for tørstof glødetab, det vil sige organisk stof, som for tørstof. Også her er den lidt højere andel af

organisk stof til biomasse for affald fra Hovedstadsområdet behandlet på ruller sigte signifikant. Der ses kun små forskelle mellem områder med fælles og individuelle skraldespande og på affald fra forskellige geografiske områder forbehandlet på forskellige forbehandlingsanlæg og ingen forskelle er statistisk signifikante.



Tabel 3.2.4: Forbehandlingseffektivitet: Biomassens andel, %, af glødetab i kildesorteret organisk dagrenovation

	<b>Neddeling+ magnetseparering</b>	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>
<b>Grindsted</b>	Forbehandlingen er gennemført 6 gange. <i>Middel: 100</i>	-	-
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 100 og 100 I: 100 og 100 <i>Middel: 100</i>	F: 57 og 62 I: 58 og 69 <i>middel: 62</i>	F: 59 og 49 I: 58 og 44 <i>middel: 53</i>
<b>Kolding</b>	-	F: 38 og 45 I: 50 og 56 <i>middel: 47</i>	F: 44 og 71 I: 33 og 56 <i>middel: 51</i>
<b>Vejle</b>	-	F: 47 og 57 I: 54 og 58 <i>middel: 54</i>	F: 28 og 59 I: 34 og 48 <i>middel: 42</i>
<b>Aalborg</b>	-	F: 42 I: 40 og 54 <i>middel: 45</i>	F: 35 og 42 I: 56 og 63 <i>middel: 49</i>
<b>Middel</b>	<i>100</i>	<i>52</i>	<i>49</i>

### 3.2.4 Forbehandlingseffektiviteter: Vand

Tabel 3.2.5 viser forbehandlingseffektiviteterne, det vil sige biomassens andel af den kildesorterede organiske dagrenovation, udtrykt i forhold til vandet i affaldet.

Tabel 3.2.5 Forbehandlingseffektivitet: Biomassens andel, %, af vand i kildesorteret organisk dagrenovation

	<b>Neddeling+ magnetseparering</b>	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>
<b>Grindsted</b>	Forbehandlingen er gennemført 6 gange. <i>Middel: 100</i>	-	-
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 100 og 100 I: 100 og 100 <i>Middel: 100</i>	F: 70 og 77 I: 71 og 73 <i>Middel: 73</i>	F: 52 og 56 I: 66 og 55 <i>Middel: 57</i>
<b>Kolding</b>	-	F: 72 og 59 I: 64 og 66 <i>Middel: 65</i>	F: 61 og 81 I: 64 og 66 <i>Middel: 68</i>
<b>Vejle</b>	-	F: 85 og 80 I: 65 og 75 <i>Middel: 76</i>	F: 57 og 66 I: 68 og 63 <i>Middel: 64</i>
<b>Aalborg</b>	-	F: 86 I: 80 og 81 <i>Middel: 82</i>	F: 65 og 55 I: 82 og 76 <i>Middel: 70</i>
<b>Middel</b>	<i>100</i>	<i>74</i>	<i>64</i>

Det fremgår umiddelbart af tabel 3.2.5, at der for forbehandlingsteknologierne gælder samme rangorden for vand som for vådvægt: Den højeste forbehandlingseffektivitet findes for forbehandling ved neddeling + magnetseparering (100%), den næsthøjeste for rullesigten (74%) og den laveste for skrueseparatoren (64%). Forskellen mellem rullesigten og skrueseparatoren er i snit 10% og er statistisk signifikant.

### 3.2.5 Forbehandlingseffektivitet: Sammenfatning

Sammenfattende kan det konkluderes, at neddeling og magnetseparering i alle tilfælde giver de højeste andele af alle parametre i biomassen, idet rejektets vægt er mindre end 1 %. Til sammenligning giver rullesigte i gennemsnit 34% rejekt og skrueseparatoren 41% målt som vådvægt. For rullesigten og skrueseparatoren var der ingen væsentlige forskelle i forbehandlingseffektiviteter mellem fælles og individuelle skraldespande. Signifikante forskelle er observeret for affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet på rullesigte, idet biomassens andel af indholdet i den kildesorterede organiske dagrenovation her er størst for vådvægt, tørvægt, tørt organisk stof og vand, sammenlignet med affald fra de øvrige geografiske områder og samtlige forbehandlinger på rullesigte og skrueseparator. At den kildesorterede dagrenovation forbehandlet på rullesigten udmærker sig sammenlignet med øvrige kombinationer af geografi og forbehandling (kun rullesigte og skrueseparator) kan skyldes at netop affaldet fra Hovedstadsområdet var det reneste (sammenlignet med affald fra Kolding, Vejle, Aalborg) og rullesigten qua sin funktionsmåde lader mere falde gennem sigten til biomassefraktionen. Forbehandlingseffektiviteterne varierer betydeligt, med relative standardafvigelser i runde tal på 10-15%, og eventuelle øvrige, men mindre forskelle i forbehandlingseffektivitet afhængig af geografi, skraldespandesystem og forbehandlingsteknologi har ikke kunnet konstateres.

### 3.3 Fysisk karakterisering

I dette afsnit beskrives den fysiske karakterisering af biomasse og rejekt, idet der lægges vægt på mængden af urenheder (plast o.a.) i biomassen.

Sigtning og centrifugering af mindre prøvevoluminer har været benyttet til denne karakterisering. De to metoder kunne ikke anvendes til fysisk karakterisering af rejektet fra forbehandlingen; men der er for en række rejektprøver foretaget en manuel opsortering, der mængdemæssigt opgør rejektets indhold af organisk biomasse, plast og "andet" (i det væsentlige metalstumper og sten).

Metodebeskrivelser og rådata findes i /1/ og en uddybning af resultaterne vedrørende sigtning og centrifugering findes i /2/.

#### 3.3.1 Fysisk karakterisering af biomasse

Biomassens indhold af partikler er karakteriseret ved sigtning og centrifugering. Det skal dog noteres, at biomassen fra rullesigten i forbindelse med prøvetagningen er neddelt i en shredder, således at de største partikler er blevet yderligere neddelt inden sigtningen og centrifugeringen.

Ved sigtning af det forbehandlede affald fås umiddelbart et visuelt indtryk af tilstedeværelse og karakter af større partikler i det forbehandlede affald herunder af neddelte fremmedlegemer - især plast. Trådsigter med diameter 200 mm og maskevidder 16 mm og 8mm er benyttet til denne vurdering. Metoden giver ikke mulighed for egentlig kvantificering, idet der sker en vis tilbageholdelse på sigtestængerne af mindre partikler især papir. Derimod opnås der en god visuel bedømmelse af de større partikler og deres karakter efter forbehandling ved at betragte sigterne. Der er gennemført sigtning af

biomasse fra alle kombinationer af kildesorteret organisk dagrenovation og forbehandling, der indgår i projektet.

Sigtning af biomassen efter forbehandling ved neddeling og magnetseparering af kildesorteret organisk dagrenovation fra Grindsted og fra Hovedstadsområdet, der jo indsamles i papirposer, resulterede tydeligt i store stykker papir på sigterne. Det er ikke umiddelbart muligt at identificere plast på sigterne fra disse prøvetyper.

Sigtning af biomassen efter forbehandling på rullsigte af kildesorteret organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet, der indsamles i papirposer, efterlod stort set ikke plast på sigterne. I den forbehandlede kildesorterede organiske dagrenovation, fra Kolding, Vejle og Aalborg (hvor der indsamles i plastposer), kan der tydeligt identificeres større og mindre stykker plast på sigterne efter forbehandling på rullsigte.

Ved sigtning af biomasse fra skrueseparatoren er der kun i meget begrænset omfang større partikler, der tilbageholdes på sigterne; men der kan dog identificeres små grønne plaststykker i de typer biomasse, hvor der anvendes grønne plastposer til indsamlingen.

En gennemgang af alle sigtebillederne i /1/ viser således:

- at der ved forbehandling på rullsigten efterlades betydelige mængder store partikler på 16 mm og 8 mm sigten uanset affaldstype. Der er ikke forskel på karakteren af det forbehandlede biomasse indsamlet efter samme kildesorteringsvejledning i områder med individuelle og fælles skraldespande; medens der er tydelig forskel på om der er anvendt plast eller ej ved indsamlingen i husstandene eller udendørs.
- at der ved forbehandlingen på skrueseparatoren i Aalborg kun undtagelsesvis efterlades partikler med en størrelse på 16 mm eller derover. Der tilbageholdes også væsentligt mindre materiale på 8 mm sigten end ved forbehandling på rullsigten. Der kan dog identificeres mindre stykker plast på sigterne.
- at den meget enkle forbehandling i Grindsted i form af neddeling og magnetseparering (kun 2 prøver) efterlader mange store partikler - især papir på 16 mm og 8 mm sigterne.

Ideen med centrifugering af det forbehandlede affald er dels at vurdere forholdet mellem mængden af partikler og vand og dels at vurdere tilstedeværelsen af uønskede materialer i biomassen, der er så småt, at det ikke kan identificeres ved sigtning; men evt. kunne genfindes i kraft af centrifugeringen, hvor lette materialer samles på overfladen og tungere f.eks. metal i bunden af centrifugeglasset. Det viste sig ikke generelt muligt at vurdere tilstedeværelsen af uønsket materiale i det forbehandlede affald, da det stort set alle i tilfælde delte sig i en relativt klar vandfase og et fast bundfald. Kun helt undtagelsesvis blev der konstateret partikler (små plaststumper) på overfladen efter centrifugeringen. Det viste sig heller ikke muligt at identificere metalstumper eller andre fejlsorteringer i bundfaldet.

### 3.3.2 Fysisk karakterisering af rejekt

Hverken sigtning eller centrifugering efter ovenstående metoder er mulig med rejktet fra forbehandlingen på grund af den store partikelstørrelse. Der er dog foretaget en manuel udsortering af 2 prøver rejkt af hver type, således at mængden af plast og andre større, ikke-organiske fremmedlegemer såsom sten

og metalstykker kan bestemmes. Efter sortering er plasten skyllet og tørvægt af plast, "andet" og den organiske fraktion inklusiv afskyllet organisk materiale fra plasten er bestemt.

Tabel 3.3.1 giver en oversigt over resultaterne, idet de 3 fraktioner er udtrykt som procent både af vådvægten, og af tørvægten for de 4 geografiske områder, der resulterede i rejekt ved forbehandling på rullsigte og skrueseparator. Der er ikke klare forskelle i plastandelen mellem fælles og individuelle skraldespande og tallene i tabel 3.3.1 viser gennemsnit for alle prøver for hvert geografisk område.

Tabel 3.3.1 Fysisk karakterisering af rejekt. Rejektprøver for fælles og individuelle skraldespande var ikke forskellige og data er her indgået samlet.

	Hovedstadsområdet		Kolding		Vejle		Aalborg	
	Rullesigte	Skrue - separ.	Rullesigte	Skrue - separ.	Rullesigte	Skrue - separ.	Rullesigte	Skrue - separ.
Antal prøver	4	4	4	4	4	4	3	4
<b>Vådvægtsbaseret</b>								
Organisk stof	98,3	98,2	89,5	93,6	84,7*	92,8	81,0*	94,1
Plast	1,6	1,2	8,9	5,4	14,9*	6,4	18,5*	5,1
Andet	0,1	0,5	1,7	1,0	0,4*	0,9	0,6*	0,7
<b>Tørvægtsbaseret</b>								
Organisk stof	95,9	94,7	78,1	86,1	75,0*	84,4	71,5*	86,1
Plast	3,8	3,7	18,0	11,8	24,2*	13,8	27,7*	12,2
Andet	0,3	1,6	3,9	2,1	0,8*	1,8	0,8*	1,6

\* En prøve indeholdt usædvanligt meget plast (≈30% ww)

Det ses, at den kildesorterede organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet, hvor sorteringen i køkkenet sker i papirposer resulterer i meget mindre andel plast i rejektet end dagrenovation fra Aalborg, Vejle og Kolding, hvor sorteringen sker i plastposer. Der er betydelig variation i plastandelen i rejektet på de enkelte prøver og en tendens til at plastandelen er større ved forbehandlingen i Herning end i Aalborg for samme affaldstype. Der er ikke klare forskelle mellem de tre områder, der benytter plastposer i køkkenet.

### 3.3.3 Fysisk karakterisering: Sammenfatning

På baggrund af sigtninger af biomassen og opsortering af rejekter kan det konkluderes:

- Biomassen fra skrueseparatoren er meget ren om end små plaststumper visuelt kan identificeres, men vægtmæssigt er det meget lidt (skønsmæssigt < 0,5%). Rullesigten resulterer i mere plast og større stykker papir i biomassen.
- Rejektet består for begge forbehandlingens vedkommende primært af organisk stof; oftest 90-98 % men undtagelsesvist af kun 80-85% på grund af usædvanligt store plastrængder. Mængden af fremmedlegemer ud over plast er forsvindende (skønsmæssigt < 1%).

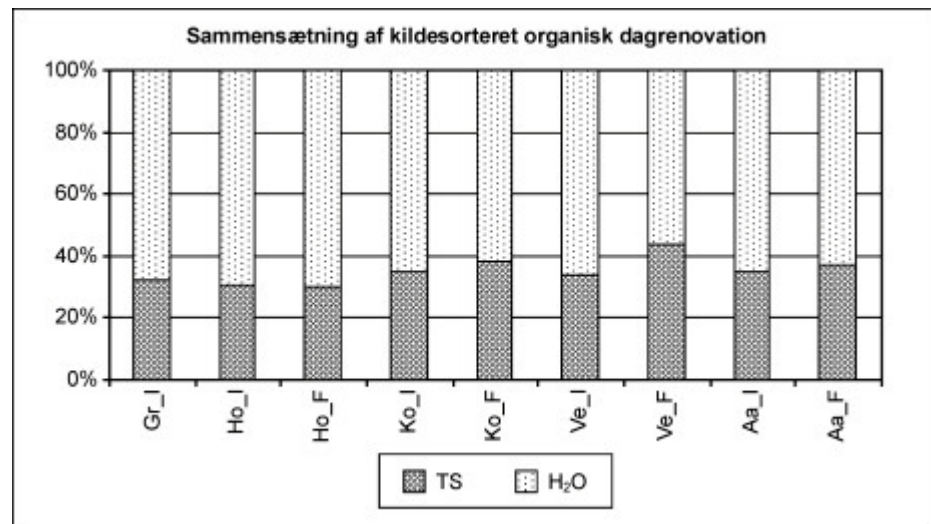
### 3.4 Kemisk karakterisering

I dette afsnit beskrives den kemiske karakterisering af den kildesorterede organiske dagrenovation. Indledningsvist beskrives den kemiske sammensætning af den kildesorterede organiske dagrenovation, idet data for biomasse og rejekt kombineres til at beskrive udgangspunktet før forbehandlingen. Dette giver mulighed for at vurdere forskelle i den kildesorterede organiske dagrenovation opdelt på geografisk område og fælles henholdsvis individuelle skraldespande inden effekten af forbehandlingen præsenteres. Efterfølgende redegøres for den tidsmæssige variation i biomassens sammensætning og variationen sammenlignes med usikkerheden på prøvetagningen og usikkerheden på de kemiske analyser. Forbehandlingsens effekt på den kemiske sammensætning beskrives i form af koncentrationer i sammenhørende prøver af biomasse og rejekt samt i form af biomassens andel af indholdet i den kildesorterede organiske dagrenovation. Endeligt beskrives den gennemsnitlige sammensætning af biomasse og rejekt fra de forskellige geografiske områder forbehandlet på de forskellige forbehandlingsanlæg.

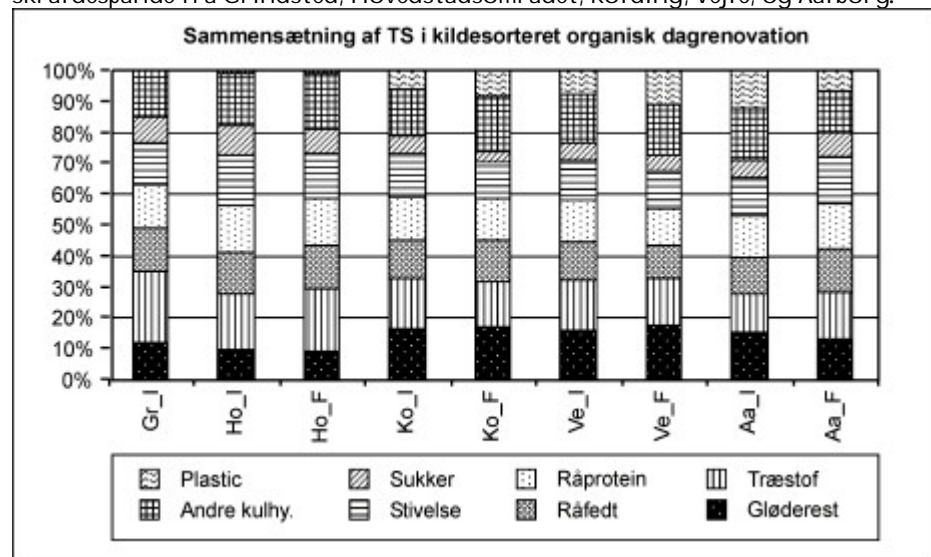
Metodebeskrivelser og rådata findes i /1/.

### 3.4.1 Sammensætningen af kildesorteret organisk dagrenovation

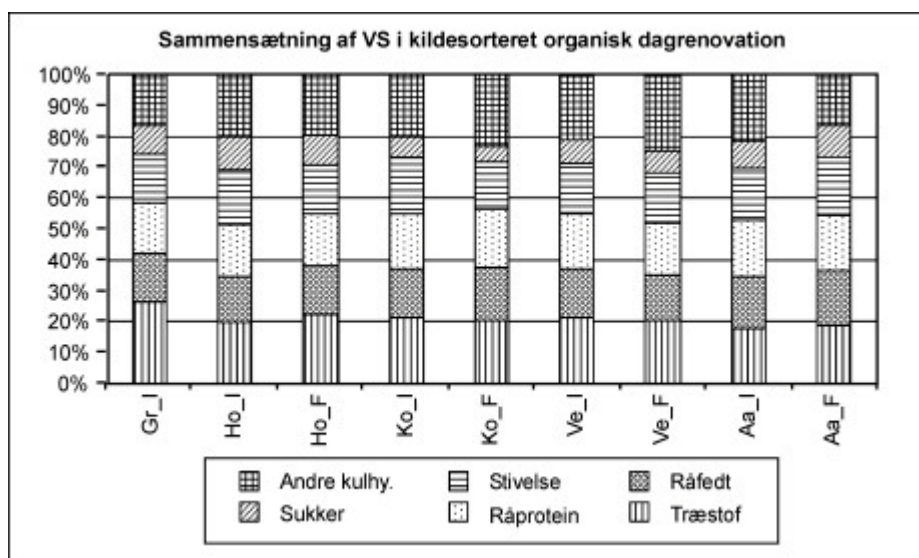
Med udgangspunkt i sammensætningen af biomassen og rejektet og deres relative andel af den kildesorterede organiske dagrenovation er sammensætningen af den kildesorterede organiske dagrenovation beregnet i figur 3.4-1 for de 5 geografiske områder opdelt for fælles henholdsvis individuelle skraldespande med hensyn til tørstof og vandindhold. Den enkelte sammensætning baserer sig i de fleste tilfælde på 4 prøver (4 biomasse + 4 rejekt) fordelt over undersøgelsesperioden. Tilsvarende er i figur 3.4-2 vist sammensætningen af tørstoffet med hensyn til askeindhold, plastindhold og komponenter i det organiske stof. Basis er også her i de fleste tilfælde 4 prøver, idet alle parametre er målt selvstændigt, bortset fra indholdet af "andre kulhydrater", der er differencen mellem de målte enkeltkomponenter og det samlede organiske indhold (glødetabet uden plast). Plastindholdet hidrører udelukkende fra rejektet og er målt som tørt plast. Der kan være synligt plast i biomassen, men vægtmæssigt er indholdet ubetydeligt. Figur 3.4-3 viser sammensætningen af det organiske tørstof, det vil sige uden plast og askeindhold.



Figur 3.4-1 Sammensætning med hensyn til tørstofindhold og vandindhold af kildesorteret organisk dagrenovation fra fælles (F) henholdsvis individuelle (I) skraldespande fra Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, og Aalborg.



Figur 3.4-2 Den komponentvise sammensætning af tørstofindholdet i kil desorteret organisk dagrenovation fra fælles (F) henholdsvis individuelle (I) skraldespande fra Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, og Aalborg.



Figur 3.4-3 Den komponentvise sammensætning af det organiske stofindhold (glødetab minus plast) i kildesorteret organisk dagrenovation fra fælles (F) henholdsvis individuelle (I) skraldespande fra Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg.

Figur 3.4-1 viser, at tørstofindholdet i det indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation er omkring 30-40 % af vådvægten. Der er store variationer i enkeltobservationerne bag middelværdier vist i figur 3.4-1; men alligevel kan der konstateres at tørstofindholdet er statistisk signifikant højere i kildesorteret dagrenovation fra fælles (F) end fra individuelle (I) skraldespande, uanset om prøverne fra Grindsted, hvor der kun indsamles i individuelle skraldespande, medregnes eller ej. Den relative forskel er ca. 10% og ses for alle geografiske områder undtagen Hovedstadsområdet. Den største og eneste signifikante forskel mellem de geografiske områder er mellem Hovedstadsområdet og Vejle, idet sidstnævnte relativt set er næsten 10% højere. For alle enkeltobservationerne varierer tørstofindholdet mellem 27 og 46 %. Langt de fleste enkeltobservationer ligger dog i intervallet 28-38 %. Enkeltstående høje indhold af tørstof skyldes i de fleste tilfælde et ekstraordinært stort indhold af tørt rejekt, hvilket indikerer at den kildesorterede organiske dagrenovation afveg fra de øvrige indsamlede prøver.

Figur 3.4-2 viser, at sammensætningen af tørstoffet i den kildesorterede organiske dagrenovation varierer mellem de 5 geografiske områder. Der er især forskel i plastindholdet, idet indsamlingssystemerne, der benytter plastposer (Kolding, Vejle, Aalborg), har væsentligt mere plast end indsamlingssystemerne, der benytter papirposer (Grindsted, Hovedstadsområdet). For Kolding og Vejle synes der endvidere at være mere plast i den kildesorterede organiske dagrenovation fra fælles skraldespande end fra individuelle skraldespande, mens dette ikke observeredes i Aalborg. Indholdet af plast er for indsamlingssystemer, der benytter plastposer, 3-24 % af TS, mens plastindholdet kun er 0-3% for indsamlingssystemer, der benytter papirposer. En almindelig tynd affaldsplastpose vejer ca. 12 g, og antages den at indeholde 2 kg vådt organisk dagrenovation, svarende til ca. 0,6 kg tørt affald, udgør plastmængden fra posen ca. 2% af TS. Da forskellen i plastindholdet i den kildesorterede organiske dagrenovation mellem indsamlingssystemer, der benytter plastposer, og indsamlingssystemer, der benytter papirposer, er større end bidraget fra plastposerne på ca. 2%, synes

brugen af plastposer at medføre yderligere plast i den kildesorterede organiske dagrenovation. De geografiske områder, der benytter papirposer, kunne på tilsvarende måde forventes at have et større indhold af "andre kulhydrater", idet indsamlingsposerne næppe har et væsentligt indhold af "træstof". Papirposen til organisk dagrenovation vejer typisk 19 g, hvilket under samme antagelser som ovenfor, svarer til et ekstra indhold på 3% målt som TS. I Grindsted benyttes yderligere papirsække til den udendørs opsamling af den kildesorterede organiske dagrenovation. En sådan poser vejer typisk 190-280 g. Grindsted Kommune har opgjort at der anvendes papirposer og papirsække svarer til ca. 5% af mængden af vådt indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation /3/, hvilket på TS-basis nærmer sig 12-15% af den indsamlede mængde. Disse bidrag er dog i nærværende undersøgelse ikke observeret som et statistisk signifikant øget indhold af andre kulhydrater i den kildesorterede organiske dagrenovation. Det tilsyneladende forhøjede indhold af træstof i den kildesorterede organiske dagrenovation fra Grindsted kan næppe forklares ud fra brugen af papirposer og papirsække.

Tabel 3.4.2 viser også, at askeindholdet er mindst i kildesorteret organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet (6-13%, middel 9,0%), lidt højere i Grindsted (8-16%, middel 12%) og Aalborg (10-15%, middel 13%), og højest i Kolding (12-20%, middel 16%) og Vejle (15-18%, middel 16%). Disse forskelle, der er statistisk signifikante, kan dog ikke henføres til askeindholdet i forskellige indsamlingsposer, idet både plastposer (askeindhold <3%) og papirposer (askeindhold <0,6%) har et meget lille askeindhold. Forskellen kan i et vist omfang relateres til kildesorteringskriterierne, idet Hovedstadsområdet har den mest udførlige og restriktive kildesorteringsvejledning mens Kolding og Vejle tillader mest i "den grønne fraktion". Kolding inkluderer kattegrus, mens Vejle inkluderer både kattegrus og potteplanter. Begge fraktioner har et højt askeindhold. Det skal bemærkes, at både Kolding og Vejle komposterer den kildesorterede organiske dagrenovation og det har kun mening at inkludere de nævnte fraktioner, når der fremstilles kompost.

Figur 3.4-3 viser, at det organiske stof rensat for plast og aske stort set er ens for alle undersøgte kildesorteringsordninger og uafhængig af geografisk område, dog er der en tendens til mere træstof i den kildesorterede organiske dagrenovation fra Grindsted. Det skal dog bemærkes at de enkelte prøver, der ligger bag middelværdierne præsenteret i figur 3.4-3, varierer ganske betydeligt, indikerende en væsentlig tidsmæssig variation i de enkelte komponenter i den kildesorterede organiske dagrenovation.

Sammenfattende kan det konkluderes at det organiske stof i husholdningerne, som det indgår i kildesorteringsordninger, grundlæggende er ens i alle kildesorteringsordninger og uafhængig af indsamlingssystemet, hvad angår indholdet af fedt, protein, stivelse, sukker, andre kulhydrater og træstof. Posesystemet til opsamling af den organiske dagrenovation i køkkenet påvirker dog sammensætningen svarende til 2- 6 % af tørstoffet. Indsamlingssystemer, der benytter plastposer, har et øget indhold plast, der i øvrigt synes at være større end begrundet i selve brugen af plastposer til indsamlingen. Kildesorterings-vejledninger, der inkluderer kattegrus og potteplanter i den kildesorterede organiske dagrenovation, synes at have et øget askeindhold; ca. 16% i forhold til 9% i affald fra den mest restriktive kildesorteringsvejledning. Tørstoffindholdet synes at være lidt højere i affald fra fællesskraldespande end fra individuelle skraldespande (2-3% absolut) for Kolding, Vejle og Aalborg. Det har ikke været muligt at identificere årsagen hertil.



### 3.4.2 Tidsmæssig variation i biomassens kemiske sammensætning

Biomassens kemiske sammensætning har været målt gentagne gange (5-6 gange) for fem kombinationer af geografisk område, boligtype og forbehandlingsteknologi, idet gentagelserne er foretaget på systemer, hvor pågældende affald forbehandlede rutinemæssigt: Affald fra Grindsted forbehandlet med neddeling og magnetseparering i Grindsted (5 prøver over 8 måneder), affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet med rullsigte på Knudmoseværket i Herning (6 prøver over 9 måneder) samt affald fra Aalborg

Tabel 3.4.1. Den tidsmæssige variation i biomassens kemiske sammensætning udtrykt som relativ standardafvigelse,  $S_{rel}$  (%) i forhold til middelværdien.

	Grindsted		Hovedstadsområdet				Aalborg			
	Individuel		Individuel		Fælles		Individuel		Fælles	
	$X_{mid}$	$S_{rel}$	$X_{mid}$	$S_{rel}$	$X_{mid}$	$S_{rel}$	$X_{mid}$	$S_{rel}$	$X_{mid}$	$S_{rel}$
Biomasse, % v/v	100	0	69,3	9	70,5	7	68,4	13	59,8	13
Tørstof, TS, % t/v	32,3	9	28,8	9	29,5	6	21,9	17	25,3	7
Glødetab, VS, % TS	90,0	1	89,2	2	88,3	3	87,6	3	89,8	3
Fedt, % af TS	13,9	15	13,7	2	13,8	12	18,0	11	18,2	5
Protein, % af TS	14,2	11	15,6	9	15,3	9	17,3	6	16,3	4
Stivelse, % af TS	13,5	28	14,2	39	14,9	38	15,2	14	19,2	21
Sukker, % af TS	8,2	13	9,1	41	9,9	41	3,1	55	7,4	36
Træstof, % af TS	22,8	14	17,3	24	17,4	18	9,3	21	10,9	17
EFOS, % af VS	91,4	2	89,6	3	90,2	3	93,8	1	93,8	1
K, % af TS	0,9	14	1,0	10	1,0	6	1,1	12	1,0	9
P, % af TS	0,4	41	0,5	31	0,4	19	0,4	11	0,3	11
N, % af TS	2,3	10	2,7	4	2,6	7	2,9	2	2,7	7
C, % af TS	48,4	3	48,7	2	48,0	4	49,4	4	49,6	3
H, % af TS	7,0	3	7,2	3	7,0	7	7,4	4	7,4	4
S, % af TS	0,2	13	0,2	12	0,2	11	0,2	8	0,2	8
Cl, % af TS	0,5	31	0,3	35	0,5	31	0,8	22	0,9	11
Brændværdi, MJ/kg TS	20,3	0,05	20,4	0,01	20,3	0,02	20,7	0,04	21,0	0,03

forbehandlet med skrueseparator i Vaarst-Fjellerad (5 og 6 prøver over 11 måneder). Resultaterne er sammenfattet i tabel 3.4.1.

Tabel 3.4.1 viser at den tidsmæssige variation i biomassens sammensætning for en given kombination af geografisk område, indsamlingssystem og forbehandling afhænger af hvilken parameter der betragtes:

- Den tidsmæssige variation er lille, relativ standardafvigelse mindre end 5%, for glødetab, EFOS, C og brændværdi.
- Den tidsmæssige variation er moderat, relativ standardafvigelse mellem 5% og 15%, for biomasseandelen, tørstof, fedt, protein, K, N, H og S.
- Den tidsmæssige variation er stor, relativ standardafvigelse større end 15%, for stivelse, sukker, træstof, P og Cl.

Disse variationer indenfor en parameter over tid må respekteres ved sammenligning af data med forskellig udgangspunkt, hvor kun få observationer haves og variationen derfor er dårligt bestemt. Dette betyder, i generelle vendinger, at forskelle for en parameter, bestemt på få data, ikke kan anses for signifikante, med mindre forskellen mindst er det dobbelte af den relative standardafvigelse.

Det skal bemærkes, at tørstofindholdet i biomassen varierer betydeligt, og da de øvrige parametre er relateret til tørstof, vil indholdet af de enkelte

parametre, udover variationen i sammensætningen som beskrevet ovenover, også være underlagt variationen i tørstofindholdet.

Tabel 3.4.2 sammenstiller ovennævnte tidsmæssige variationer bestemt i tabel 3.4.1 med prøvetagningsusikkerheden bestemt i analysen af prøvetagningsproceduren og usikkerheden på den kemiske analyse repræsenteret ved den prøve, der blev analyseret i hver af de gennemførte analyseserier. De i tabel 3.4.2 indgående usikkerheder er ikke umiddelbart additive, men viser at variationen på en kemisk parameter indeholder bidrag fra usikkerhed ved prøvetagningsproceduren, fra usikkerhed ved udførelsen af den kemiske analyse samt fra den naturlige variation i udgangsmaterialets sammensætning. Dataene i tabel 3.4.2 indikerer, at kvaliteten af den anvendte prøvetagningsprocedure og af de udførte kemiske analyser er god og står i et fornuftigt forhold til den naturlige variation i biomassen, fordi den naturlige variation for langt de fleste parametre er betydeligt større end analyse- og prøvetagningsusikkerheden.

Sammenfattende kan det konkluderes at, sammensætningen af biomassen for et givet system (geografi, indsamlingssystem, forbehandling) varierer over tid og at variationen er forskellig for forskellige parametre. Den største variation ses for stivelse og sukker, som er let omsættelige komponenter og derfor formentlig også påvirket af affaldets alder og opbevaringstemperatur. Også P og Cl, der begge forekommer i relative lave indhold, udviser store variationer. Den relative standardafvigelse er af størrelsen 30-40%. For de øvrige parametre er den tidsmæssige variation væsentlig mindre og for centrale parametre som tørstof, glødetab og EFOS kun 3-10%. Kvaliteten af de benyttede prøvetagningsprocedurer og analyseprocedurer, som er evaluerede hver for sig, synes at stå i fornuftigt forhold til den tidsmæssige variation af biomassens sammensætning. Den tidsmæssige variation skal tages i betragtning ved vurderingen af forskelle baseret på prøver udtaget på forskellige tidspunkter.

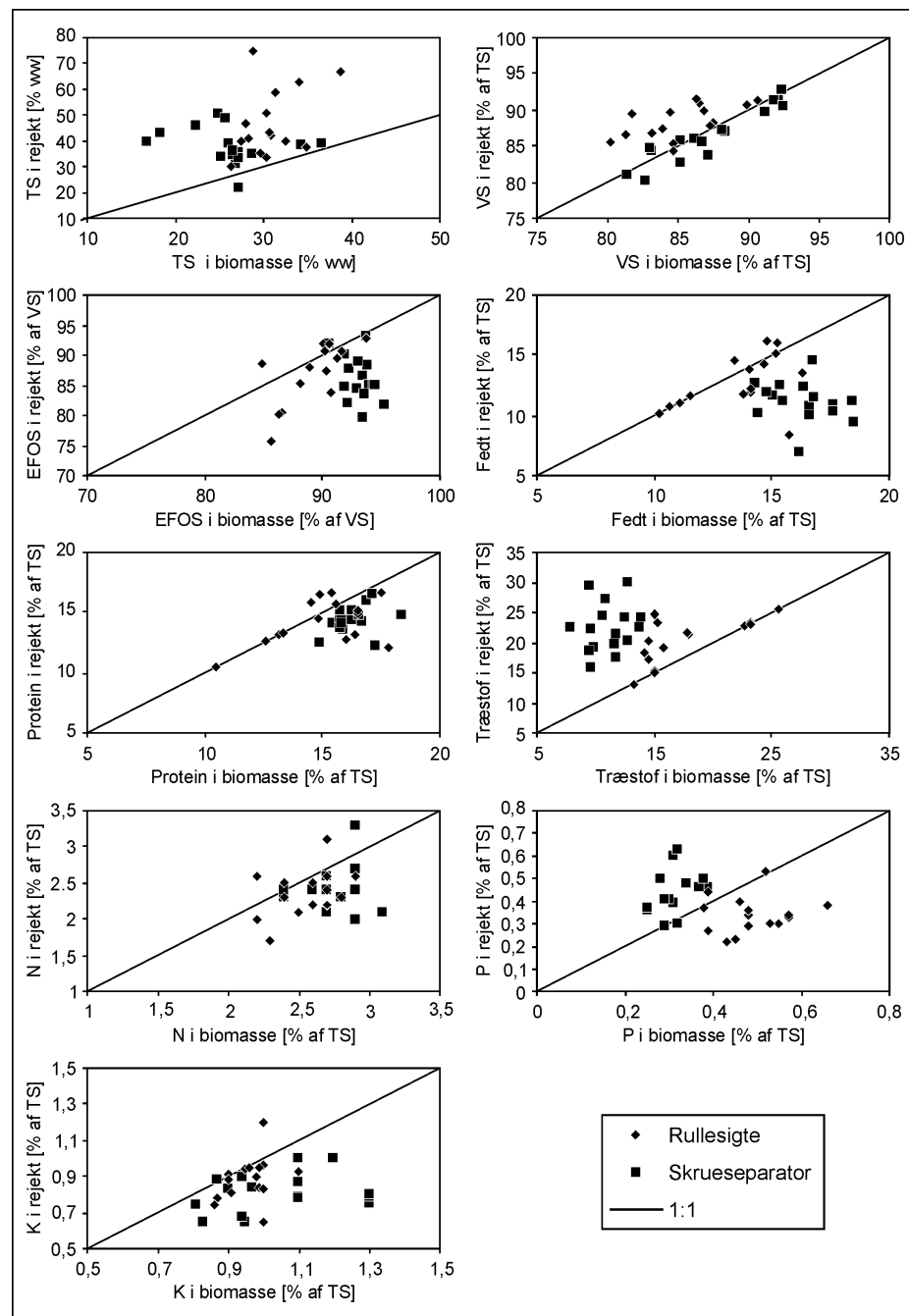
Tabel 3.4.2 : Sammenligning af den relative standardafvigelse udtrykt i % ( $S_{rel.}$ , %) for en række kemiske parametre som vurderet med udgangspunkt i analysen af prøvetagningsproceduren (prøvetagning), prøven der blev analyseret med hver analyseserie (Analyse) samt de tidsmæssig fordelte prøver præsenteret i tabel 3.4-1.

	Prøvetagning	Analyse	Tidsmæssig variation (tabel 3.4-1) for				
			Gr/I	Ho/I	Ho/F	Aa/F	
	$S_{rel.}$ %	$S_{rel.}$ %	$S_{rel.}$ %	$S_{rel.}$ %	$S_{rel.}$ %	$S_{rel.}$ %	$S_{rel.}$ %
Tørstof, TS, % t/v	-	-	9	9	6	17	7
Glødetab, VS, % TS	1	4	1	2	3	3	3
Fedt, % af TS	6	4	15	12	12	11	5
Protein, % af TS	2	1	11	9	9	6	4
Stivelse, % af TS	33	3	28	39	38	14	21
Sukker, % af TS	16	18	13	41	41	55	36
Træstof, % af TS	5	5	14	24	18	21	17
EFOS, % af VS	2	1	2	3	3	1	1
K, % af TS	0	7	14	10	6	12	9
P, % af TS	10	12	41	31	19	11	11
N, % af TS	3	4	10	4	7	2	7
C, % af TS	2	2	3	2	4	4	3
H, % af TS	3	3	3	3	7	4	4
S, % af TS	3	8	13	12	11	8	8
Cl, % af TS	6	29	31	35	31	22	11
Brændværdi, MJ/kg TS	2	1	5	1	2	4	3

### 3.4.3 Forbehandlingsens effekt på sammensætning af biomasse og rejekt

Forbehandlingsens effekt, hvad angår biomassens andel af vådvægt, tørstofindhold og indhold af organisk stof, målt som tørstof glødetab, i den kildesorterede organiske dagrenovation, er præsenteret i afsnit 3.2.

I dette afsnit beskrives forbehandlingsens effekt på kvaliteten af biomasse og rejekt, idet forskellige parametres koncentration i biomasse og den organiske del af rejektet (rejekt minus plast) er vist i figur 3.4-4: TS, VS, fedt, protein, træstof, EFOS, N, P og K.



Figur 3.4-4 Koncentrationen af TS, VS, fedt, protein, træstof, EFOS, N, P og K i biomasse og rejekt (den organiske del af rejektet, dvs. minus plast) for samhörende målinger fra forbehandlet kildesorteret organisk dagrenovation (f.eks. %K i % af TS i biomassen) fra rullesigte og skrueseperator.

Figur 3.4-4 viser, at rullerisigten generelt ikke er koncentrationsmæssig selektiv (det vil sige at koncentrationen ikke er væsentlig forskellig i biomasse og i den organiske del af rejektet) med hensyn til parametrene: VS, fedt, protein, træstof, EFOS, N og K. Men rullerisigten er koncentrationsmæssig selektiv i væsentligt omfang med hensyn til TS, idet TS er højere i rejekt end i biomasse, og med hensyn til P, hvor biomassens koncentration er højest.

Figur 3.4-4 viser, at skrueseparatoren generelt ikke er koncentrationsmæssig selektiv (det vil sige at koncentrationen ikke er væsentlig forskellig i biomasse og i den organiske del af rejektet) med hensyn til VS. Men skrueseparatoren er koncentrationsmæssig selektiv i væsentligt omfang med hensyn til TS, træstof og P, der er højere i rejekt end i biomasse, og med hensyn til EFOS, fedt, protein, N og K, idet disse parametre koncentrationsmæssigt er højest i biomassen.

For sukker, stivelse og Cl er der ingen systematisk koncentrationsmæssig selektivitet for hverken rullerisigte eller skrueseparator.

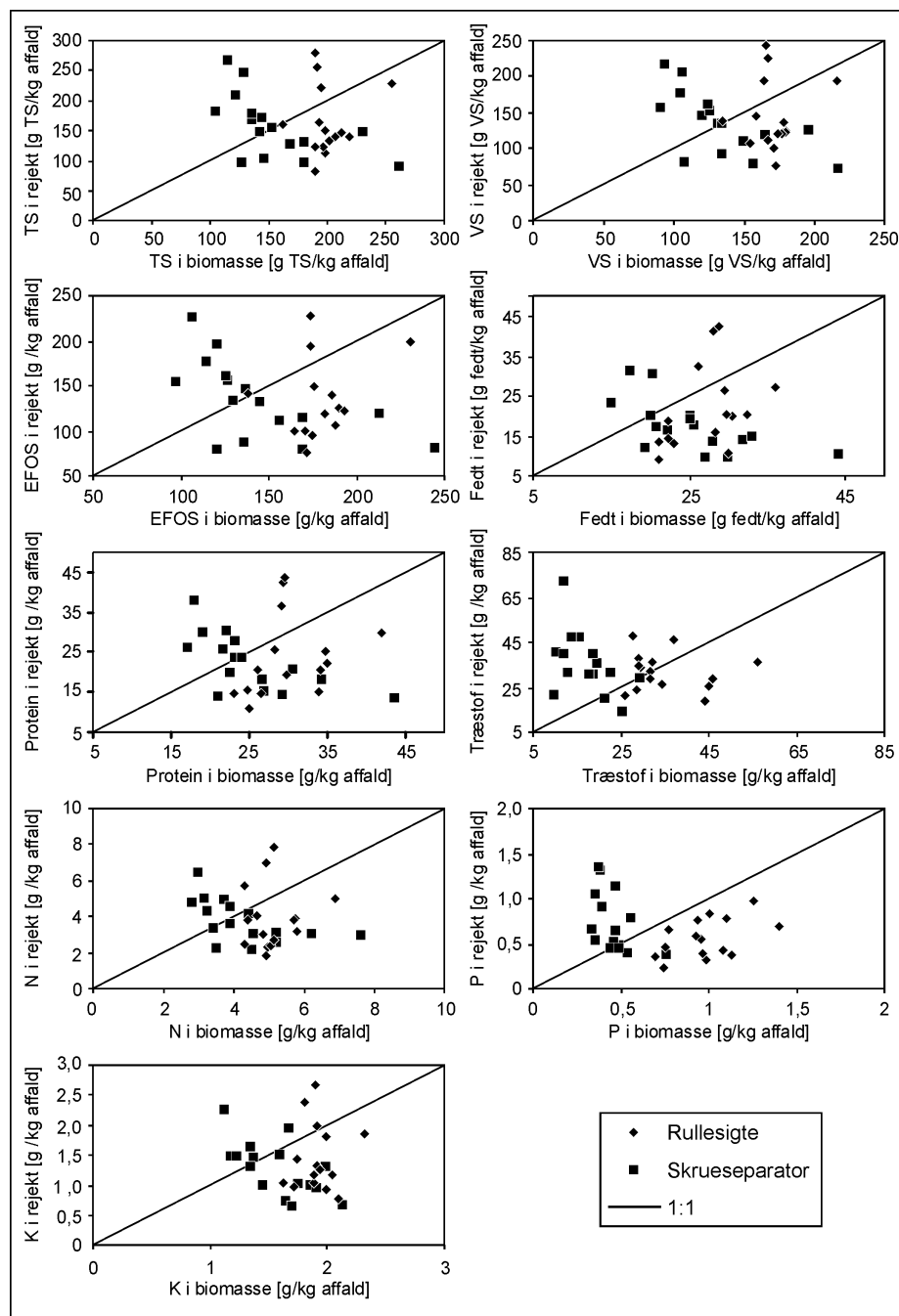
#### 3.4.4 Forbehandlingsens effekt på stoffordelingen mellem biomasse og rejekt

I dette afsnit beskrives effekten af forbehandlingen med hensyn til fordeling i biomasse og i rejekt af indholdet af TS, VS, fedt, protein, træstof, EFOS, N, P og K til stede i den våde kildesorterede organiske dagrenovation. Figur 3.4-5 viser indholdet af en parameter i rejektet (for eksempel g i rejektet pr. kg vådt kildesorteret organisk dagrenovation) afbildet mod det tilsvarende indhold i biomassen (for eksempel g i rejektet pr. kg vådt kildesorteret organisk dagrenovation). Figur 3.4-5 bygger således på den koncentrationsmæssige fordeling vist i figur 3.4-4 og oplysningerne om forbehandlingsens fordeling af vådvægt præsenteret i afsnit 3.2.

Figur 3.4-5 viser, at rullerisigten generelt ikke er masse-mæssig selektiv (det vil sige at massen er ligeligt fordelt i biomasse og i den organiske del af rejektet) med hensyn til parametrene: TS, VS, fedt, protein, træstof, EFOS, N og K. Men rullerisigten er masse-mæssig selektiv i væsentligt omfang med hensyn til P, idet ca. 2/3 af P i den kildesorterede organiske dagrenovation findes i biomassen efter forbehandlingen.

Figur 3.4-5 viser, at skrueseparatoren generelt ikke er masse-mæssig selektiv (det vil sige at massen er ligeligt fordelt i biomasse og i den organiske del af rejektet) med hensyn til parametrene: TS, VS, fedt, protein, EFOS, N og K. Men skrueseparatoren er masse-mæssig selektiv i væsentligt omfang med hensyn til træstof og P, idet der efter forbehandlingen er mest træstof og P i rejektet.

I figur 3.4-5 er effekten af forbehandlingen kun analyseret opdelt efter forbehandlingsteknologi (rullerisigte og skrueseparator, idet forbehandling med neddeling og magnetseparering ikke resulterer i nævneværdigt rejekt) uagtet affaldets geografiske oprindelse. Tabel 3.4.3 viser biomassens andel af samtlige parametre efter forbehandling udtrykt som middel for de forskellige geografiske områder og forbehandlingsteknologi. For de centrale parametre fedt, protein, træstof og EFOS samt næringsstofferne N, P og K er der af hensyn til den statistiske behandling af observationerne under middelværdierne angivet de bagvedliggende enkeltobservationer.



Figur 3.4-5 Koncentrationen af TS, VS, fedt, protein, træstof, EFOS, N, P og K i samhørende målinger af biomasse og rejeckt (organiske del af rejeckt, dvs. minus plast) udtrykt på basis af koncentrationen i den våde kil desorterede organisk dagrenovation (for eksempel g i rejeckt pr. kg våd kil desorteret organisk dagrenovation) fra rullesigte og skrueseperator.

Tabel 3.4.3 Biomassens andel, %, af den kildesorterede organiske dagrenovation udtrykt som middel (understreget) for de forskellige geografiske områder og forbehandlingsteknologier (N+M: neddeling + magnetseparering, Rul.: Rullesigte, Skr.: skrueseparator). For parametrene fedt, protein, træstof, EFOS, N, P og K er der under middelværdierne angivet de bagvedliggende enkeltobservationer.

	Grdst	Hovedstadsområdet			Kolding		Vejle		Aalborg	
	N+M	N+M	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.
Vådvægt	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>70</u>	<u>56</u>	<u>58</u>	<u>62</u>	<u>67</u>	<u>56</u>	<u>67</u>	<u>64</u>
Tørstof, TS	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>62</u>	<u>52</u>	<u>48</u>	<u>51</u>	<u>56</u>	<u>42</u>	<u>47</u>	<u>49</u>
Glødetab, VS	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>62</u>	<u>53</u>	<u>47</u>	<u>51</u>	<u>54</u>	<u>42</u>	<u>45</u>	<u>49</u>
Fedt	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>66</u>	<u>63</u>	<u>58</u>	<u>67</u>	<u>66</u>	<u>52</u>	<u>55</u>	<u>60</u>
	100	100	62	74	44	60	67	38	43	42
	100	100	67	59	57	83	68	71	54	57
	100	100	61	70	55	56	63	42	68	62
	100	100	73	51	76	68	68	58		78
	100									
Protein	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>66</u>	<u>56</u>	<u>57</u>	<u>59</u>	<u>66</u>	<u>49</u>	<u>54</u>	<u>55</u>
	100	100	59	64	44	51	68	34	43	41
	100	100	68	54	59	79	69	67	53	47
	100	100	63	60	54	44	64	41	65	61
	100	100	73	46	72	61	64	52		69
	100									
Stivelse	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>68</u>	<u>56</u>	<u>49</u>	<u>77</u>	<u>63</u>	<u>53</u>	<u>55</u>	<u>58</u>
Sukker	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>60</u>	<u>48</u>	<u>40</u>	<u>69</u>	<u>48</u>	<u>41</u>	<u>52</u>	<u>51</u>
Træstof	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>57</u>	<u>37</u>	<u>51</u>	<u>37</u>	<u>55</u>	<u>34</u>	<u>53</u>	<u>36</u>
	100	100	53	38	41	26	55	24	46	25
	100	100	60	37	48	68	55	52	56	33
	100	100	50	43	57	15	50	21	59	32
	100	100	64	30	59	38	58	39		54
	100									
EFOS	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>64</u>	<u>54</u>	<u>58</u>	<u>57</u>	<u>65</u>	<u>49</u>	<u>56</u>	<u>55</u>
	100	100	58	61	52	50	65	34	46	42
	100	100	66	50	56	78	66	66	56	45
	100	100	61	61	65	41	65	41	65	61
	100	100	70	45		58	65	54		70
	100									
K	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>65</u>	<u>55</u>	<u>58</u>	<u>61</u>	<u>65</u>	<u>54</u>	<u>56</u>	<u>59</u>
	100	100	53	63	45	52	66	36	46	47
	100	100	69	52	64	79	67	69	58	47
	100	100	64	61	57	48	62	50	65	70
	100	100	73	45	64	66	65	61		75
	100									
P	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>68</u>	<u>39</u>	<u>66</u>	<u>48</u>	<u>70</u>	<u>37</u>	<u>66</u>	<u>43</u>
	100	100	54	50	58	48	76	28	59	24
	100	100	76	41	69	71	77	32	64	35
	100	100	63	43	63	31	62	51	75	53
	100	100	77	22	74	44	63			61
	100									
N	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>67</u>	<u>58</u>	<u>56</u>	<u>58</u>	<u>67</u>	<u>49</u>	<u>53</u>	<u>54</u>
	100	100	60	68	45	53	68	34	42	41
	100	100	69	52	56	75	70	69	52	45
	100	100	65	63	56	44	63	39	66	62
	100	100	73	47	68	61	65	53		69
	100									
C	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>63</u>	<u>55</u>	<u>55</u>	<u>55</u>	<u>63</u>	<u>47</u>	<u>54</u>	<u>53</u>
H	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>64</u>	<u>56</u>	<u>55</u>	<u>56</u>	<u>63</u>	<u>48</u>	<u>54</u>	<u>54</u>
S	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>63</u>	<u>54</u>	<u>56</u>	<u>56</u>	<u>63</u>	<u>48</u>	<u>54</u>	<u>54</u>
Cl	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>54</u>	<u>59</u>	<u>56</u>	<u>60</u>	<u>53</u>	<u>60</u>	<u>50</u>	<u>64</u>
Brændværdi	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>64</u>	<u>55</u>	<u>54</u>	<u>54</u>	<u>62</u>	<u>46</u>	<u>54</u>	<u>52</u>

Det ses af tabel 3.4.3, at biomassens andel af de forskellige komponenter i det organiske stof i den kildesorterede organiske dagrenovation i et vist omfang afhænger både af affaldets oprindelse og af forbehandlingsteknologi. Eneste generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseparatoren er at rullesigten fordeler mere P og træstof over i biomassen end skrueseparatoren gør. Massemæssigt betragtet er der dog ingen signifikante generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseparatoren med hensyn til at fordele det nedbrydelige organiske stof målt som EFOS til biomassen. Men som diskuteret neden for er der en forskel specifikt for affald fra Hovedstadsområdet og Vejle.

For affald fra Kolding og Aalborg er der kun – træstof og P undtaget - små forskelle mellem rullesigtens og skrueseparatorens fordeling af den kildesorterede dagrenovations indhold til biomassen. I runde tal havner 50-55% af alle komponenter i biomassen. For affald fra Hovedstadsområdet og fra Vejle forholder dette sig noget anderledes, idet rullesigten for en række komponenter masse-mæssigt her fordeler mere til biomassen på rullesigten end på skrueseparatoren: det drejer sig i begge tilfælde om protein, EFOS, K, P, N, C, H og brændværdi. En god forklaring herpå haves ikke.

### 3.4.5 Kvaliteten af biomasse

Selv om forskellene i sammensætningen af den kildesorterede organiske dagrenovation fra de forskellige geografiske områder, repræsenterende forskellige kildesorteringssystemer, var relative små og primært vedrørte indholdet af plast og aske i affaldet, kan forbehandlingsteknologiernes forskellig funktion resultere i forskelle i biomassens sammensætning. Dette er søgt illustreret i tabel 3.4.4, der viser den gennemsnitlige sammensætning af biomasse fra 5 geografiske områder kombineret med de 3 forbehandlingsteknologier.

Tabel 3.4.4 viser, at den konstaterede forskel i askeindhold i den kildesorterede organiske dagrenovation for de forskellige geografiske områder også genfindes i biomassen: Askeindholdet er størst i biomasse fra Kolding og Vejle (15,0-16,7%) og mindst i Hovedstadsområdet (6,5-11,2%) og Grindsted (10,0%) og ikke signifikant påvirket af forbehandlingen.

Tabel 3.4.4 Biomassens sammensætning i gennemsnit for de forskellige geografiske områder og forbehandlingsteknologier (N+M: neddeling + magnetseparering, Rul.: Rullesigte, Skr.: skrueseparator).

	Grns	Hovedstadsområde		Kolding		Vejle		Aalborg		
	t	N+	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.
	N+M	N+M								
Biomasse, % v/v	100,0	100,0	70,0	55,5	58,2	61,9	67,2	56,1	66,8	63,7
Tørstof, TS, % t/v	32,3	29,5	29,2	27,3	31,7	28,0	33,1	26,7	29,4	23,4
Glødetab, VS, % TS	90,0	93,3	88,8	92,3	83,4	84,3	83,5	85,2	85,6	88,8
Aske, % af TS	10,0	6,7	11,2	7,7	16,6	15,7	16,5	14,8	14,4	11,2
Fedt, % af TS	13,9	14,9	13,8	16,6	15,0	16,8	12,2	15,0	14,1	18,1
Protein, % af TS	14,2	14,3	15,5	17,0	16,0	16,4	14,0	15,6	15,0	17,0
Stivelse, % af TS	13,5	15,1	14,5	22,5	12,8	16,6	13,2	15,7	16,1	17,1
Sukker, % af TS	8,2	9,5	9,5	8,1	4,9	4,6	5,6	4,3	8,6	5,2
Træstof, % af TS	22,8	21,3	17,4	12,2	16,0	10,2	19,6	11,5	14,8	10,1
EFOS, % af VS	91,4	91,0	89,9	93,0	88,0	93,3	88,5	93,0	90,0	93,9
K, % af TS	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0	1,1
P, % af TS	0,4	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3



N, % af TS	2,3	2,4	2,6	2,8	2,6	2,8	2,5	2,7	2,4	2,8
C, % af TS	48,4	51,3	48,3	50,5	47,5	47,6	47,0	48,5	46,7	49,3
H, % af TS	7,0	7,5	7,1	7,7	7,0	7,2	6,9	7,2	6,8	7,4
S, % af TS	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Cl, % af TS	0,5	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,4	0,8	0,5	0,9
Brændværdi, MJ/kg TS	20,3	21,1	20,3	21,5	19,3	19,7	19,4	19,7	19,6	20,8

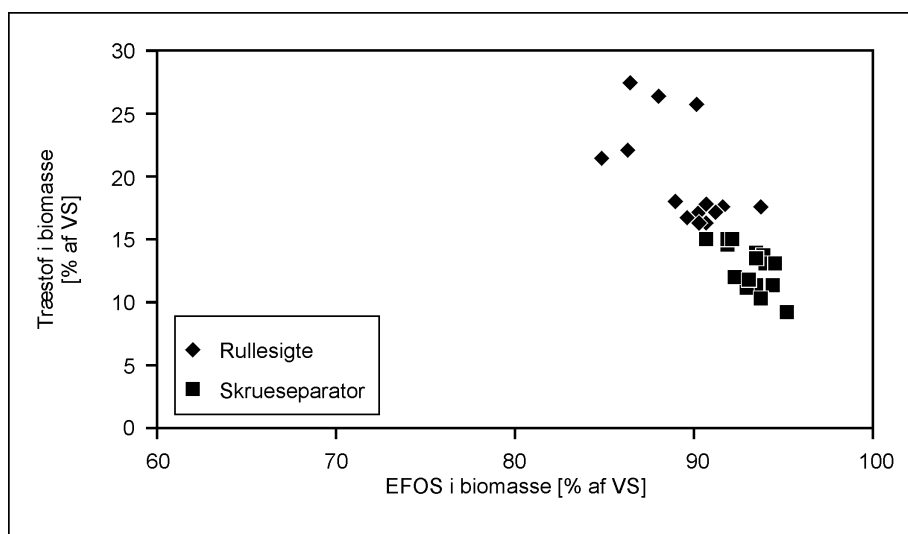
Bortset fra denne forskel i askeindholdet er der, hvad angår det geografiske udgangspunkt, ikke konstateret signifikante forskelle i sammensætningen af biomassen.

De væsentligste forskelle i biomassens sammensætning skyldes forbehandlingen. Forskellen mellem neddeling + magnetseparering og rullesignting er med hensyn til den resulterende biomasses sammensætning marginal (P indholdet er svagt større i rullesigntet biomasse end i neddelt + magnetsepareret biomasse), idet det er indregnet at denne sammenligning kun har kunnet foretages for kildesorteret organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet. Den væsentligste forskel findes mellem biomasse fra rullesigt og fra skrueseparator. Generelt kan de siges, at biomasse fra skrueseparator, sammenlignet med biomasse fra rullesigte, indeholder mere vand (relativt 7-20% mindre TS), mere fedt (relativt 10-20% mere), mindre træstof (relativt 22-40% mindre) og mere EFOS (EFOS er 97,3-99,3 % af VS for skrueseparatoren sammenlignet med 87-94% af VS for rullesigten: det vil sige at det organiske stof er lettere nedbrydeligt efter forbehandling med skrueseparator) samt mindre P (relativt 50% lavere).

Mens sukker, stivelse, protein og fedt i almindelighed er let nedbrydelige anses træstof kun for delvist nedbrydeligt, hvilket underbygges af figur 3.4-6, der viser at træstof og EFOS er negativt korrelerede: det vil sige jo mere træstof, des mindre EFOS og dermed mindre nedbrydelighed. Det må dog konstateres at det organiske stof i langt overvejende grad er let nedbrydeligt, idet den enzymnedbrydelige andel udgør 92-98% af det organiske stof. Figur 3.4-6 viser, at også godt halvdelen af træstoffet er enzymfordøjeligt.

Komponentfraktionerne fedt, protein, stivelse og sukker er individuelle kvantitative bestemmelser, mens fraktionen andre kulhydrater udgøres af differensen mellem det samlede organiske stof (det vil sige glødetab) og summen af enkeltkomponenterne. Enkeltkomponenterne repræsenteres ofte med henblik på den senere beregning af deres potentiale for metandannelsen ved typiske grundstofformuleringer:

- Fedt:  $C_{57}H_{104}O_6$
- Protein:  $C_5H_7NO_2$
- Kulhydrater (stivelse, sukker, andre):  $C_6H_{12}O_6$ ,  $C_5H_5(OH)_2OCH_2OH$



Figur 3.4-6 Sammenhæng mellem biomassens koncentration af træstof og biomassens koncentration af EFOS (procentdel af organisk stof, VS der er enzymfordøjeligt).

På basis heraf kan grundstofindholdet af C, H og O beregnes:

- Kulstof i målte enkeltkomponenter svarer til et C-indhold i biomassen på 42-49% C, hvilket sammenlignet med det direkte målte C-indhold på 45-54% C svarer til, at der kan redegøres for 84-102% af biomassens kulstofindhold. I gennemsnit kan der redegøres for 93%.
- Brint i målte enkeltkomponenter svarer til et H-indhold i biomassen på 5,7-6,7% H, hvilket i sammenlignet med det direkte målte H-indhold på 6,1-8,0% H svarer til, at der kan redegøres for 80-92% af biomassens H-indhold. I gennemsnit kan der redegøres for 86%.
- Ilt i målte enkeltkomponenter svarer til et O-indhold i biomassen på 31-38% O. Iltindholdet er ikke målt direkte men kan beregnes som forskellen mellem summen af C,H, N og S og den samlede organiske vægt (S-indholdet er ca. 0,2% og N-indholdet 2-3%), hvilket giver et O-indhold på 25-32% O svarende til at der kan redegøres for 102-140% af biomassens O-indhold. I gennemsnit kan der redegøres for 122%.

Ovenstående beregninger tyder på at antagelserne om enkeltkomponenternes gennemsnits sammensætning i et vist omfang underestimerer biomassens indhold af kulstof og brint og overestimerer indholdet af ilt. I forhold til beregningen af metanpotentialet kan det overvejes at justere komponentsammensætningen. Dette er ikke gjort her, da metanpotentialet også beregnes ud fra den målte grundstofsammensætning.

#### 3.4.6 Kvaliteten af rejektet

Den fysiske sammensætning af rejekterne er beskrevet i afsnit 3.3.2 hvad angår indholdet af organisk stof, plast og ”andet”. I langt de fleste tilfælde udgør det organiske stof hovedparten af tørstofindholdet i rejektet. Tabel 3.4.5 viser sammensætning af rejektets organiske fraktion i gennemsnit for de forskellige geografiske områder og forbehandlingsteknologier. Overordnet set er det organiske stof i rejektet ikke væsentligt forskellig fra det organiske stof i biomassen. Mindre forskelle ses dog med hensyn til fedt og EFOS, hvor koncentrationerne i rejektet er lavere end i biomassen, og med hensyn til træstof, hvor koncentrationerne i rejektet er højere end i biomassen, især for rejekt fra skrueseparatoren.

Tabel 3.4.5 Sammensætning af rejektets organiske fraktion i gennemsnit for de forskellige geografiske områder og forbehandlingsteknologier (Rul.: Rullesigte, Skr.: skrueseparator).

	Hovedstadsområdet		Kolding		Vejle		Aalborg	
	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.	Rul.	Skr.
Antal prøver	4	4	4	4	4	4	3	4
Tørstof, TS, % t/v	38,8	30,7	42,9	40,7	49,1	42,0	60,3	39,0
Glødetab, VS, % TS	90,7	91,5	87,6	84,0	86,2	84,9	89,0	85,4
Aske, % af TS	9,3	8,5	12,4	16,0	13,8	15,1	11,0	14,6
Fedt, % af TS	12,6	10,8	12,9	9,9	11,6	11,7	14,3	12,1
Protein, % af TS	14,5	15,2	14,1	13,7	12,8	14,1	15,9	14,5
Stivelse, % af TS	10,4	12,9	15,3	10,6	11,5	11,7	16,2	12,2
Sukker, % af TS	8,6	5,4	5,7	3,5	7,0	5,8	9,9	5,7
Træstof, % af TS	22,1	24,2	18,3	24,2	23,4	19,9	16,2	21,3
EFOS, % af VS	90,1	89,9	87,0	85,4	81,8	84,1	89,4	85,1
K, % af TS	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8
P, % af TS	0,4	0,6	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	0,5
N, % af TS	2,3	2,4	2,4	2,5	2,1	2,5	2,7	2,5
C, % af TS	48,3	47,3	47,0	46,3	46,3	46,5	49,7	47,3

H, % af TS	7,0	7,0	6,9	6,8	6,7	6,8	7,3	6,8
S, % af TS	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Cl, % af TS	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5
Brændværdi, MJ/kg TS	20,4	20,1	19,9	19,6	20,0	19,8	20,7	20,2

Brændværdierne repræsenteret i tabel 3.4.5 omfatter kun det organiske stof i rejektet. Det skal noteres at ved betragtninger over rejektets disponering, for eksempel til forbrænding, skal mængden af frasorteret plast indregnes (se afsnit 3.3.2).

### 3.4.7 Kemisk karakterisering: sammenfatning

Ved at betragte den kemiske sammensætning af prøverne af biomasse og af rejekt har været muligt at etablere viden om en række væsentlige aspekter:

- Det kildesorterede affalds sammensætning varierer mellem de geografiske områder men synes forklarlige ud fra forskelle i kildesorteringsvejledning og i poser anvendt til indsamlingen: Kattegrus, pottleplanter og lignede inkluderet i den grønne fraktion synes at øget askeindholdet i den kildesorterede organiske dagrenovation, og anvendelsen af plastposer i indsamlingen øger indholdet af plast, dog også udover den plastmængde der skyldes selve indsamlingsposerne. Set i forhold til sammensætningen af det organiske indhold er der ikke nævneværdige forskelle mellem de forskellige geografiske områder og ej heller mellem fælles og individuelle skraldespande.
- Forbehandlingens betydning for biomassens andel af de forskellige komponenter i den kildesorterede organiske dagrenovation afhænger i et vist omfang både af affaldets oprindelse og af forbehandlingsteknologi. Eneste generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseeparatoren er at rullesigten masse-mæssigt fordeler mere P og træstof over i biomassen end skrueseeparatoren gør. Masse-mæssigt betraget er der dog ingen signifikante generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseeparatoren med hensyn til at fordele det nedbrydelige organiske stof målt som EFOS til biomassen. Dog er der for de enkelte geografiske områder en række særlige forhold. For affald fra Kolding og Aalborg er der kun – træstof og P undtaget - små forskelle mellem rullesigtens og skrueseeparatorens fordeling af den kildesorterede dagrenovations indhold til biomassen. I runde tal havner 50-55% af alle komponenter i biomassen. For affald fra Hovedstadsområdet og fra Vejle forholder dette sig noget anderledes, idet rullesigten her fordeler mere protein, EFOS, K, P, N, C, H og brændværdi til biomassen end skrueseeparatoren.
- Biomassens sammensætningen varierer over tid for et givet system (geografi, indsamlingssystem, forbehandling) og variationen er forskellig for forskellige parametre. Den største variation ses for stivelse og sukker, som er let omsættelige komponenter og derfor formentlig også påvirket af affaldets alder og opbevaringstemperatur. Også P og Cl, der begge forekommer i relative lave indhold, udviser store variationer. Den relative standardafvigelse er af størrelsen 30-40%. For de øvrige parametre er den tidsmæssige variation væsentlig mindre og for centrale parametre som tørstof, glødetab og EFOS kun 3-10%.
- Biomassens sammensætning varierer mellem de geografiske områder, idet den konstaterede forskel i askeindhold i den kildesorterede organiske dagrenovation for de forskellige geografiske områder også

genfindes i biomassen: Askeindholdet er størst i biomasse fra Kolding og Vejle (15,0-16,7%) og mindst i Hovedstadsområdet (6,5-11,2%) og Grindsted (10,0%) og ikke signifikant påvirket af forbehandlingen. Bortset fra denne forskel i askeindholdet er der hvad angår det geografiske udgangspunkt ikke konstateret signifikante forskelle i sammensætningen af biomassen.

- De væsentligste forskelle i biomassens sammensætning skyldes forbehandlingen. Forskellen mellem neddeling + magnetseparering og rullesigtning er med hensyn til den resulterende biomasses sammensætning marginal. Den væsentligste forskel findes mellem biomasse fra rullesigt og fra skrueseparator. Generelt kan de siges, at biomasse fra skrueseparator, sammenlignet med biomasse fra rullesigte, indeholder mere vand (relativt 7-20% mindre TS), mere fedt (relativt 10-20% mere), mindre træstof (relativt 22-40% mindre) og mere EFOS (EFOS er 97,3-99,3 % af VS for skrueseparatoren sammenlignet med 87-94% af VS for rullesigten) samt mindre P (relativt 50% lavere).
- Det organiske stof i rejektet er overordnet set ikke væsentligt forskellig fra det organiske stof i biomassen. Mindre forskelle ses dog med hensyn til fedt og EFOS, hvor koncentrationerne i rejektet er lavere end i biomassen, og med hensyn til træstof, hvor koncentrationerne i rejektet er højere end i biomassen, især for rejekt fra skrueseparatoren

### 3.5 Metanpotentiale

Dette afsnit beskriver laboratoriemålinger af biogaspotentialet i biomasse såvel som i rejekt. Biogaspotentialet er bestemt på 2 prøver af hver affaldstype (geografisk område, fælles henholdsvis individuel skraldespand) for hver af de gennemførte forbehandlinger, i alt 41 bestemmelser på biomasse og 16 bestemmelser på den organiske del af udvalgte rejekter.

Biogaspotentialet er endvidere beregnet ud fra den kemiske sammensætning af affaldet og sammenlignet med de målte biogaspotentialer.

Metodebeskrivelser og rådata findes i /1/.

#### 3.5.1 Måling af metanpotentialet

Biogaspotentialet er målt i et batch system i laboratoriet karakteriseret ved:

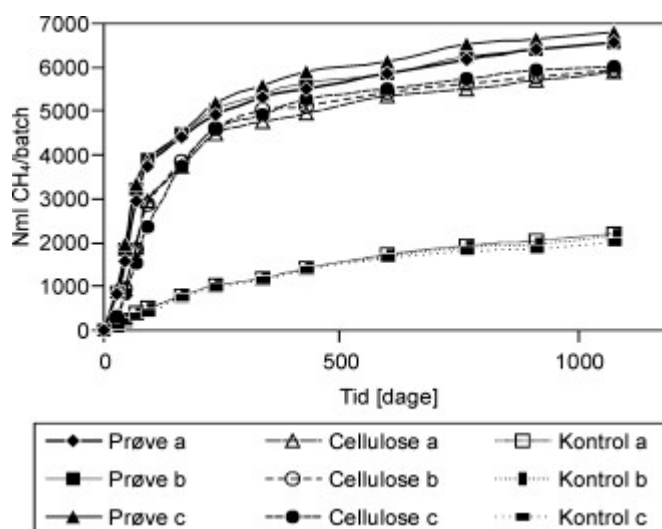
- 2 l glasreaktorer opstillet i triplikater
- Stor mængde podemateriale fra Vegger biogasanlæg
- Findelt affald, ca. 10 g TS pr. reaktor
- 55°C i 50 døgn
- Gasdannelsen måles direkte i form af dannet metan

Metoden er et kompromis mellem på den ene side ønsket om at bruge en stor prøvemængde for at minimere effekten af affaldets inhomogenitet og på den anden side en praktisk gennemførlighed uden for store og vanskeligt håndterbare gasmængder. Endvidere har det været et ønske at måle metandannelsen direkte, idet kuldioxid, der er den anden væsentlige komponent i den dannede gas, i stor udstrækning opløses i vandfasen svingende med pH i vandfasen. Findeling af affaldet er gennemført for at give mulighed for at udtage 10 g TS så repræsentativt som muligt og for at fremme omsætningen. Temperaturen, 55 °C, er typisk for termofil udrådning

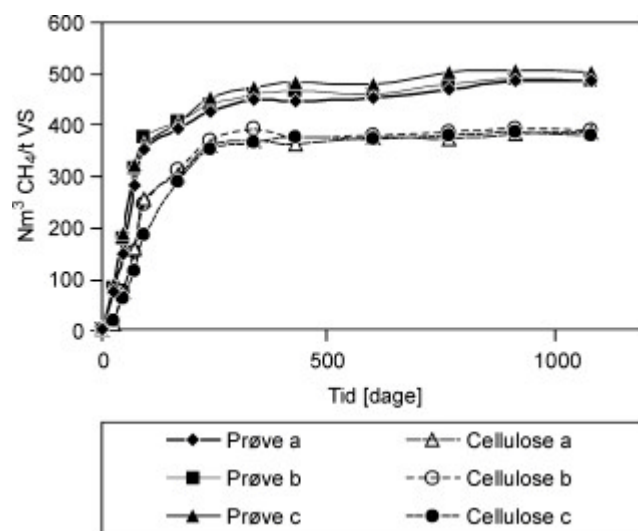
og skulle tillade en hurtigere omsætning af affaldet. Biogaspotentialt som sådan forventes ikke at være afhængig af hverken partikelstørrelsen eller temperaturen, om end disse parametre vil have væsentlig betydning for det aktuelle gasudbytte i et kontinuert drevet biogasanlæg.

Podemateriale og affald tilsættes en 2 l glasflaske, således at ca. 0,5 l er væske og 1,5 l er luftvolumen. Dette fyldes med en blanding af kvælstof og kuldioxid og flasken aflukkes med et tryktæt skruelåg forsynet med en tyk, gastæt membran, hvorigennem en sprøjte kan stikkes. Flasken opbevares ved 55°C. Gennem de næste 50 døgn rystes flasken jævnlige og der udtages løbende fra flasken en 0,2 ml gasprøve, der umiddelbart efter udtagning analyseres for metan på en gaskromatograf med en termisk detektor (FID). Gasprøven udtages ved det aktuelle tryk i flasken og udmåles kvantitativt som en mængde metan. Når trykket i flasken stiger over 1,5-2 atmosfære udluftes gassen, idet mængden af metan der fjernes bestemmes ud fra en måling før og efter udluftningen. Den dannede metanmængde udtrykkes ved standardbetingelser (N: 273°K og 100000Pa, hvilket er 0°C og 1 atmosfæres tryk) pr. g tilsat VS som funktion af tiden. Parallelt med målingen af metandannelsen i prøven måles også metandannelsen i podematerialet alene ligesom metandannelsen for en standard cellulose prøve måles. Sidstnævnte bruges til at vurdere om podematerialet har fungeret tilstrækkeligt godt. Metanpotentialmålingerne opstilles typisk med 12-18 prøver i hver serie svarende til 42 til 60 reaktorer.

Figur 3.5-1 viser akkumulerede metandannelseskurver for prøve inklusiv podemateriale, for celluloseprøve inklusiv podemateriale og for podematerialet alene. Figur 3.5-2 viser de resulterende kurver for metanpotentialt for prøve og celluloseprøve, idet podematerialets bidrag nu er fratrukket. Den maksimale akkumulerede metanmængde i løbet af 50 døgn er metanpotentialt. Det bemærkes, at affaldsprøven er meget let omsættelig, idet langt størstedelen af metandannelsen (80-90%) sker inden for de første 10 dage. Der må dog ikke lægges for meget i kurveforløbet, da det afspejler bachforsøgets betingelser og ikke direkte må anvendes til at udsige noget om metandannelsen i en fuld-skala reaktor.



Figur 3.5-1 Akkumulerede metandannelseskurver for prøve af biomasse inklusiv podemateriale, for celluloseprøve inklusiv podemateriale og for podematerialet alene.



Figur 3.5-2 Resulterende kurver for metanpotentialiet for prøve og celluloseprøve, idet podematerialets bidrag nu er fratrukket, jævnfør figur 3.5-1.

Kun metandannelsen er målt, men ønskes det overslagsmæssigt beregnet, hvor meget gas, det vil sige blandingen af metan og kuldioxid, der dannes, kan det antages, at gasmængden er 50% større end metanmængden.

De væsentligste usikkerhedskilder ved den benyttede metode er kvaliteten af det benyttede podemateriale, usikkerhed omkring fordelingen af den samme mængde podemateriale i alle reaktorer, tilsætningen af en homogen mængde affald til alle reaktorer samt den biologiske udvikling i den enkelte reaktor. Temperaturkontrollen, prøvetagningen og selve metanmålingen skønnes kun at være behæftet med ringe usikkerhed. Metodens usikkerhed er søgt kvantificeret statistisk i /1/, men erfaringsgrundlaget og datamaterialet er stadig begrænset og usikkerhederne må derfor antages at være store. Da datamaterialet, som usikkerhedsbetragtningerne bygger på, blev etableret i løbet af undersøgelsesperioden, var der for de fleste af de gennemførte målinger af metanpotentialer ikke *a priori* opstillet et statistisk begrundet sæt kvalitetssikringsregler.

Målingerne af metanpotentialer er gennemført over 7 serier, hvoraf en er en om-måling, da det benyttede podemateriale viste sig at afvige fra tidligere benyttet podemateriale, og en er siden hen kasseret på grund af for lille metanpotentialer i celluloseprøverne. Celluloseprøverne viser i gennemsnit for de 5 benyttede serier 382 Nml CH<sub>4</sub>/g VS hvilket svarer til ca. 92% af cellulosens teoretiske metanpotentialer. Variationen (største minus mindste) er i gennemsnit for de 3 celluloseprøver 60 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. I den første serie gav celluloseprøverne i gennemsnit kun 309 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, hvilket sammenlignet med de senere målinger er lavt i forhold til de opstillede kontrolregler (de efterfølgende gav: 335, 387, 396, 417, 374 Nml CH<sub>4</sub>/g VS) og følgelig har målingerne fra denne serie måtte kasseres. Det har af tidsmæssige årsager ikke været muligt at måle prøverne om.

Reproducerbarheden baseret på triplikater er estimeret til 67 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, hvilket er 95% konfidensintervallet for metanpotentialer målt på forskellige tidspunkter i løbet af undersøgelsen. Dette betyder, at den samme prøves metanpotentialer målt på to forskellige tidspunkter i 95% af alle tilfælde må forventes at ligge med forskel på 67 Nml CH<sub>4</sub>/g VS eller mindre.

### 3.5.2 Metanpotentiale: Biomasse

Tabel 3.5.1 viser de i laboratoriet 30 målte metanpotentialer, hvor den første måleserie er udeladt, udtrykt som Nml CH<sub>4</sub>/g VS (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton VS) for biomasse fra forskellige geografiske områder og forbehandlingsteknologi for henholdsvis fælles (F) og individuelle (I) skraldespande.

Metanpotentialemålingerne er behæftet med væsentlig usikkerhed; inden for prøver repræsenterende samme geografiske område og samme forbehandlingsteknologi men udtaget på forskellige tidspunkter er den relative standardafvigelse i middel 13% eller 65 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Metanpotentialet udtrykt på basis af organisk stof, her VS, udviser ingen systematiske forskelle med hensyn til geografisk område, indsamlingssystem eller forbehandlingsteknologi. I gennemsnit er biomassens metanpotentiale 465 Nml CH<sub>4</sub>/g VS og den samlede relative standardafvigelse 14%.



Tabel 3.5.1: Målte metanpotentialer for biomasse (Nml CH<sub>4</sub>/g VS)

	<b>Neddeling+ magnetseparering</b>	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>
<b>Grindsted</b>	I: 495 og 513 <i>Middel: 504</i>	-	-
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 416 og 463 I: 463 og 530 <i>Middel: 468</i>	F: 495 og 500 I: 498 og 298 <i>Middel: 446</i>	F: 449 I: 435 <i>Middel: 442</i>
<b>Kolding</b>	-	F: 404 og 504 I: 573 og 388 <i>Middel: 467</i>	F: 459 I: 521 <i>Middel: 490</i>
<b>Vejle</b>	-	F: 515 I: 519 <i>Middel: 517</i>	F: 320 og 454 I: 492 og 462 <i>Middel: 432</i>
<b>Aalborg</b>	-	F: 410 I: 464 og 546 <i>Middel: 473</i>	F: 380 og 469 I: 566 <i>Middel: 472</i>
<b>Middel</b>	<i>480</i>	<i>470</i>	<i>455</i>

### 3.5.3 Metanpotentialer: Rejekt

Som vist i afsnit 3.3.2 indeholder rejektet væsentlige mængder organisk biomasse, der på basis af sammensætningen præsenteret i tabel 3.4.5 vurderes i store træk at minde om det organiske stof i biomassen. Dog indeholder rejektets organiske stof mere træstof og lavere EFOS, hvilket indikerer mindre nedbrydelighed. Metanpotentialer i det organiske stof i rejektet er målt i 16 tilfælde, som præsenteret i tabel 3.5.2.

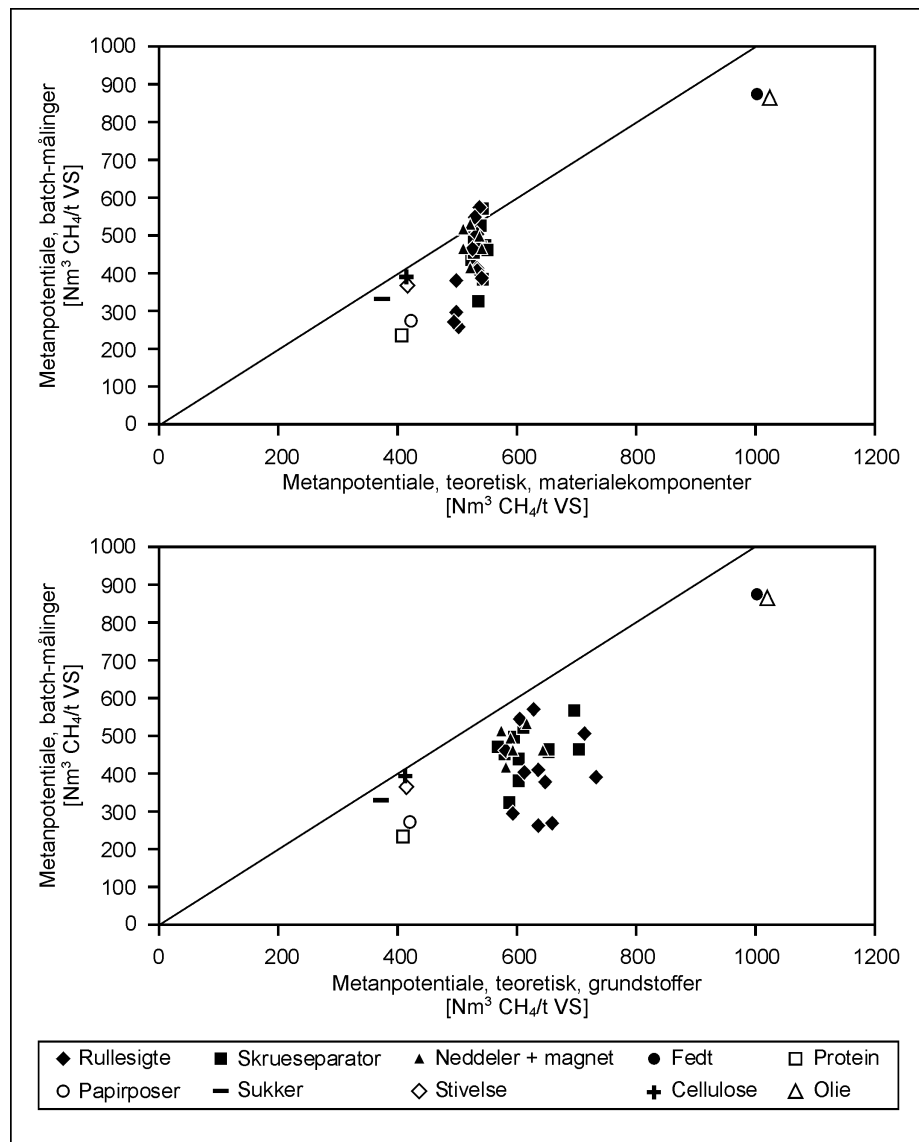
Inden for prøver repræsenterende samme geografiske område og samme forbehandlingsteknologi, men udtaget på forskellige tidspunkter, er den relative standardafvigelse i middel 17% eller 55 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Det organiske stof i rejektet resulterer i mindre metan end det organiske stof i biomassen: For rullesigten er metanpotentialer 280 Nml CH<sub>4</sub>/g VS eller ca. 40% mindre end i biomassen og for skrueseparatoren er metanpotentialer 355 Nml CH<sub>4</sub>/g VS eller ca. 25% mindre end i biomassen. Metanpotentialer i det organiske stof i rejektet fra skrueseparatoren er statistisk set ikke signifikant højere end metanpotentialer i det organiske stof i rejektet fra rullesigten. Metanpotentialer målt for det organiske stof i rejektet fra rullesigten tilført kildesorteret organisk dagrenovation fra Vejle er lavere end de øvrige målinger. Dette kan ikke umiddelbart forklares; for eksempel er EFOS i de 2 prøver 86 og 90% og som sådan ikke afvigende fra EFOS i de øvrige rejektprøver (81-95%).

Tabel 3.5.2: Målte metanpotentialer for den organiske fraktion af rejekter (Nml CH<sub>4</sub>/g VS)

	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseparator</b>
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 325 I: 553 <i>Middel: 439</i>	F: 426 I: 367 <i>Middel: 397</i>
<b>Kolding</b>	F: 204 I: 257 <i>Middel: 231</i>	F: 390 I: 417 <i>Middel: 404</i>
<b>Vejle</b>	F: 156 I: 105 <i>Middel: 131</i>	F: 210 I: 312 <i>Middel: 261</i>
<b>Aalborg</b>	F: I: 329 og 307 <i>Middel: 318</i>	F: 276 og 442 I: <i>Middel: 359</i>
<b>Middel</b>	<i>280</i>	<i>355</i>

#### 3.5.4 Metanpotentiale: Beregnede og målte værdier

Figur 3.5-3 viser sammenhængen mellem målte metanpotentialer og beregnede potentialer for biomassen ud fra henholdsvis komponentsammensætningen (fedt, protein, kulhydrater) og grundstofsammensætningen (C, H, O og N). Forskellen mellem de to beregninger er, at den komponentbaserede beregning bygger på målte koncentrationer af de pågældende komponenter, omregnet til VS, og antagelser om typiske grundstofsammensætninger af de pågældende komponenter, mens den grundstofbaserede beregning bygger på faktiske målinger af grundstoffernes koncentration, omregnet til VS for biomassen.



Figur 3.5-3 Metanpotentiale målt i batch-forsøg som funktion af teoretisk beregnede metanpotentiale.

Begge beregninger er berettigede, da der tidligere konstateredes en mindre afvigelse mellem grundstofferne C, H og O i komponenterne og de faktiske målte koncentrationer.

I figur 3.5-3 er endvidere vist målinger og beregninger for en række rene komponenter som sukker, stivelse, cellulose, fedt og papirposer. Resultaterne for disse komponenter viser, at der over et stor interval (400–1000 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, svarende til 400–1000 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS) er en tydelig korrelation mellem beregnede og målte værdier, mens dette ikke kan konstateres for beregnede og målte værdier for biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation: Her falder alle de beregnede værdier baseret på enkeltkomponenter inde for et snævert interval (ca. 80 Nml CH<sub>4</sub>/g VS) mens de målte falder inden for et væsentligt større interval (ca. 300 Nml CH<sub>4</sub>/g VS). De beregnede værdier baseret på grundstoffer falder inden for et noget bredere interval (ca. 180 Nml CH<sub>4</sub>/g VS) mens de målte stadig falder inden for et væsentligt større interval (ca. 300 Nml CH<sub>4</sub>/g VS). Inden for de skitserede intervaller er der ingen korrelation mellem beregnede og målte metanpotentiale. På basis af enkeltprøver varierer det målte metanpotentiale mellem 60 og 106% (gennemsnit 85%) af det beregnede potentiale baseret på enkeltkomponenter

og mellem 50 % og 91% (gennemsnit 72%) af det beregnede potentiale baseret på grundstoffer. Det beregnede metanpotentiale er større baseret på grundstoffer (gennemsnitligt ca. 17%) end på enkeltkomponenter, hvilket passer med at målingerne viser større indhold af C og H i biomassen end redegjort for ud fra enkeltkomponenterne. Det kan ikke på basis af en direkte sammenligning af de beregnede og målte værdier afgøres, hvilken fremgangsmåde der er bedst.

### 3.5.5 Metanpotentiale i kildesorteret organisk dagrenovation

I tabel 3.5.3 er de målte biogaspotentialer, oprindeligt udtrykt i forhold til VS, også præsenteret pr. ton oprindelig våd kildesorteret dagrenovation. Det ses her, at den store mængde organisk stof, der fjernes med rejektet, betyder næsten en halvering af den potentielle mængde metan pr. ton våd kildesorteret organisk dagrenovation. I snit er metanpotentialet pr. ton kildesorteret organisk dagrenovation ca. 22% højere ved forbehandling med rullesigte end ved skrueseperator.

Tabel 3.5.3: Målte metanpotentiale for biomasse udtrykt i forhold til våd kildesorteret organisk dagrenovation (Nml CH<sub>4</sub>/g våd kildesorteret organisk dagrenovation før forbehandling)

	<b>Neddeling+ magnetseparering</b>	<b>Rullesigte</b>	<b>Skrueseperator</b>
<b>Grindsted</b>	I: 128 og 144 <i>Middel: 136</i>	-	-
<b>Hovedstadsområdet</b>	F: 116 og 132 I: 125 og 141 <i>Middel: 129</i>	F: 89 og 86 I: 88 og 51 <i>Middel: 79</i>	F: 59 I: 55 <i>Middel: 57</i>
<b>Kolding</b>	-	F: 67 og 68 I: 91 og 60 <i>Middel: 72</i>	F: 100 I: 78 <i>Middel: 89</i>
<b>Vejle</b>	-	F: 91 I: 86 <i>Middel: 89</i>	F: 30 og 89 I: 45 og 62 <i>Middel: 57</i>
<b>Aalborg</b>	-	F: 69 I: 76 og 95 <i>Middel: 80</i>	F: 40 og 59 I: 89 <i>Middel: 63</i>
<b>Middel</b>	<i>131</i>	<i>78</i>	<i>64</i>

### 3.5.6 Metanpotentiale: sammenfatning

Målinger af metanpotentialet i laboratoriet over 50 døgn viser, at det organiske stof i biomassen fra forbeholdt kildesorteret organisk dagrenovation har et stort metanpotentiale på gennemsnitligt 465 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Målingerne udviser nogen variation men der er ingen systematiske forskelle mellem geografiske områder, fælles og individuelle skraldespande og ej heller forbehandling.

Metanpotentiale beregnet enten ud fra komponentsammensætningen eller ud fra grundstofsammensætningen viser som forventet noget højere værdier end de faktisk målte, men der er ingen korrelation mellem beregnede og målte værdier. Betragtes organisk stof med meget varierende sammensætning, for eksempel rent fedt og rent sukker, er der en klar korrelation mellem beregnede og målte værdier. For biomasse fra forbeholdt organisk dagrenovation er variationen imidlertid så lille at den overskygges af variationen i den biologiske måling af metanpotentialet. Det kan ikke ud fra de gennemførte forsøg afgøres om måling eller beregning giver de mest brugbare estimater på metanpotentialet.

Rejektets organiske del udviser også et væsentligt metanpotentiale, på VS-basis dog 25-40% mindre end potentialet i biomassen. Dette indikerer, at kunne der ved forbehandlingen fordeles en større mængde af det organiske stof til biomassen frem for til rejektet, vil også metanpotentialet i biomassen øges målt i forhold til den kildesorterede organiske dagrenovation, om end der ikke vil være fuld linearitet.

### 3.6 Pilot-biogasanlæg

Dette afsnit beskriver metanudbyttet af biomasse bioforgasset på et pilot-biogasanlæg. Metanudbyttet er bestemt på 17 prøver repræsenterende et spænd af affaldstyper (geografisk område, fælles henholdsvis individuel skraldespand, forbehandling). Pilot-biogasanlægget er tilført den pågældende affaldstype dagligt i op til 3 måneder og metanudbyttet er først bestemt når driften er blevet stabil.

Afløbet fra pilot-biogasanlægget er karakteriseret med hensyn til kemisk sammensætning, restmetanpotentiale bestemt i laboratoriet samt restmetanudbyttet målt i pilot-biogasanlægget efter ophør af indfødning. Biogasudbyttet er endvidere søgt korreleret med metanpotentialerne rapporteret i afsnit 3.5

Metodebeskrivelser og rådata findes i /1/.

#### 3.6.1 Pilot-biogasanlæg

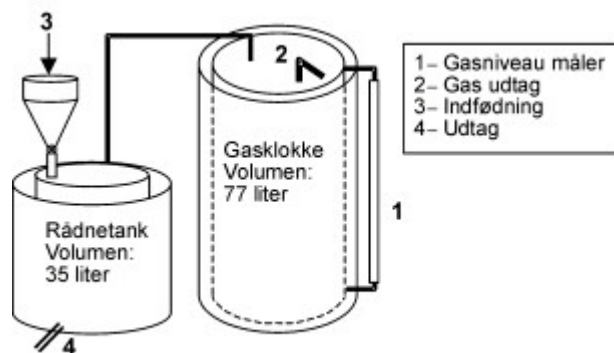
Metanudbyttet ved kontinuert bioforgasning af biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation er målt i pilot-biogasanlæg opstillet på Sjölanda rensningsanlæg i Malmø. Pilot-anlægget har 5 parallelle forsøgsopstillinger, der i dette forsøg har været karakteriseret ved:

- Indfødning og udtag 1 gang i døgnet over en periode på 3 måneder
- Organisk belastning: 2,8 kg VS/m<sup>3</sup> og døgn
- Opholdstid i reaktoren: 15 døgn
- Temperatur: 55 °C
- Tørstof indhold i indfødte materiale: 5 %
- Reaktorvolumen: 35 l, som er ca. 2/3 fyldt, og opblandet ved hjælp af propelomrører

Pilot-biogasanlægget er vist i figur 3.6-1. Reaktoren opstartes med podningsmateriale fra et fuldskala biogasanlæg i normal drift med termofil udrådning, enten anlægget i Kalmar eller i Vänersborg, Sverige. De målte metanudbytter har ikke varieret med podningsmaterialet. Over en periode på 2-3 uger tilføres reaktoren biomasse, hvorefter reaktoren drives med daglig indfødning af biomasse og udtag af afgasset biomasse. Gasproduktion og metanindhold måles dagligt. Metan udgør ved stabil drift 58-66% af biogasen (Gennemsnit: 62% +/- 2% absolut standardafvigelse). Efter en periode med stabil drift er en sammenhængende periode på 10 dage valgt til bestemmelse af metanudbyttet. Dette er bestemt ved lineær regression af sammenhængen mellem akkumuleret metanproduktion og akkumuleret mængde organisk stof tilført reaktoren. Regressionskoefficienterne var alle større end 0,997 ( $r^2$ ). Hældningen udtrykker metanudbyttet i Nml CH<sub>4</sub>/g VS eller Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton tilført VS. Ved afslutningen af forsøget blev en prøve udtaget til i et batchforsøg at måle restpotentialet i det afgassede biomasse. Efter

indfødingen var standset blev metandannelsen i reaktoren målt indtil den ophørte. Driften har undervejs været monitoreret løbende (pH, temperatur, VFA og bufferkapacitet) samt lejlighedsvist karakteriseret med andre parametre.

Ammoniumindholdet i podematerialet har været omkring 2g/l men stabiliseres ved fuld drift omkring 0,5 g/l. Protein nedbrydningen beregnes til ca. 70-75%. Bioforgasningen har ikke været påvirket af høje ammonium-koncentrationer.

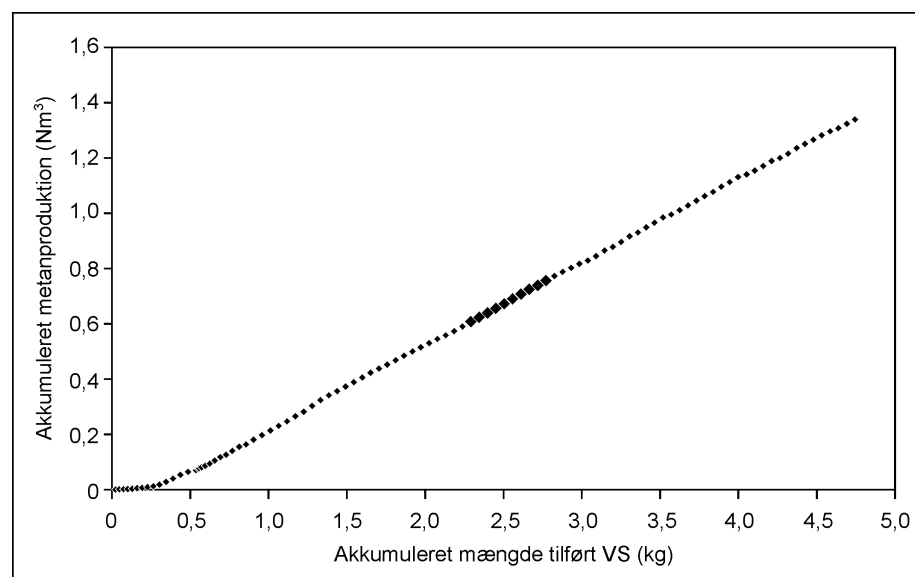


Figur 3.6-1 Skitse af pilot-biogasanlæg

### 3.6.2 Metanudbytte

Metanudbyttet er bestemt ved lineær regression af akkumuleret metanproduktion mod akkumuleret indfødnings af VS. Metanudbyttet målt som  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{g VS}$  eller  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ton}$  tilført VS er lig hældningen på regressionen. Figur 3.6-2 viser et typisk eksempel.

Tabel 3.6-1 viser de målte metanudbytter. Da målingen af metanudbyttet i et kontinuert drevet pilot-biogasanlæg er en meget ressourcekrævende procedure er antallet af målinger relativt begrænset og eventuelle tilsyneladende forskelle skal vurderes med forsigtighed, da målingens reproducerbarhed er usikkert bestemt. På VS-basis er der ingen generelle signifikante forskelle på biomasse fra rullsigte og fra skrueseparator og ej heller forskelle mellem geografiske områder. Metanudbyttet på den enlige prøve bestemt for Grindsted ligger i den lave ende,



Figur 3.6-2 Akkumuleret metanproduktion mod akkumuleret indfødning af organisk biomasse målt som VS. Den fremhævede del af linje viser hvor regressionen er foretaget

Tabel 3.6.1: Målt metanudbytte af biomasse i pilot-biogasanlæg (Nml CH<sub>4</sub>/g VS)

	Neddeling+magnetseparering	Rullesigte	Skrueseparator
Grindsted	I: 289	-	-
Hovedstadsområdet	-	F: 349 I: 347 og 340	I: 275*
Kolding	-	F: 353 I: 353 og 322	-
Vejle	-	F: 311	F: 319
Aalborg	-	I: 328	F: 400 I: 367 og 410
Middel	289	339	354

\* Denne værdi er usikker, da forsøget ikke var helt stabilt, da metanudbyttet blev bestemt.

men denne er ikke signifikant mindre end de øvrige værdier. I gennemsnit er metanudbyttet 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS eller Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton VS og den relative standardafvigelse er 11%.

### 3.6.3 Afgasset biomasse

Den afgassede biomasse, som aftappes hver dag fra pilot-biogasanlægget, er opsamlet over en længere periode, hvor pilot-biogasanlægget har kørt stabilt. Dette materiale er blevet kemisk karakteriseret i 9 tilfælde. De kemiske analyser kræver en del tørstof og det har ofte ikke været muligt at opsamle tilstrækkeligt tørstof til en fuld kemisk karakterisering. Resultaterne fremgår af tabel 3.6.2.

Ved afslutningen af forsøgsperioden er der udtaget prøve til måling af restmetan -mere korrekt restmetanpotentialet – i laboratoriet i batch system ved 55 °C indtil metandannelsen er ophørt (typisk 100 døgn). Måling er udført som ved metanpotentialemålingen, beskrevet i afsnit 3.5, bortset fra at der ikke er benyttet podemateriale. Efter indfødningen i pilot-biogasanlægget er standset har reaktoren været i fortsat drift indtil metandannelsen er ophørt. Denne metanmængde er også et udtryk for en restmetanmængde. Begge de målte restmetanmængder er vist i tabel 3.6.2. Målingen af restmetanmængden er meget usikker, især i pilot-biogasanlægget.

Tabel 3.6.2 viser, at det afgassede biomasse har et højt askeindhold, lavt EFOS indhold og lave indhold af letomsættelige komponenter som fedt, stivelse og sukker. Proteinindholdet er højere end i den rå biomasse, idet den mikrobielle population i reaktoren udover at nedbryde proteiner også syntetiserer proteiner til egen vækst. Indholdet af N, P og K er steget i forhold til tørstofindholdet, hvilket skyldes tørstoffets omsætning. Biomassen er velomsat og restmetanmængden i form af metan, der efterfølgende kan dannes, er typisk 40 – 50 Nml CH<sub>4</sub>/g VS svarende til ca. 12-15% af det faktiske metanudbytte i pilot-biogasanlægget

Tabel 3.6.2: Restmetan og sammensætning af afgasset biomasse fra pilot-biogasanlæg

	Grind	Hovedstads.		Kolding		Vejle		Aalborg	
	N+M	Rul. 1	Rul. 2	Rul. 1	Rul. 2	Rul.	Skr.	Skr. 1	Skr. 2
Restmetan, Nml CH <sub>4</sub> /g VS* Pilot-biogasanlæg	-	70	-	20	14	31	13	27	5
Restmetan, Nml CH <sub>4</sub> /g VS* Batch-måling	72	38	53	42	43	35	35	48	44
Tørstof, TS, % t/v	0,9	1,1	1,6	1,1	0,7	0,8	1,2	1,2	1,3
Glødetab, VS, % TS	67	72	-	-	-	-	69	-	61
Aske, % af TS	33	28	30	38	27	38	31	30	39
Fedt, % af TS	7	6	5	7	6	5	5	8	4
Protein, % af TS	23	27	24	22	22	21	22	22	20
Stivelse, % af TS	0,9	-	0,3	0,4	0,3	0,7	0,3	0,2	0,4
Sukker, % af TS	-	-	0,8	0,1	0,3	0,3	0,0	-	0,3
Træstof, % af TS	16	15	16	8	19	16	14	19	9
EFOS, % af VS	57	53	53	57	42	44	52	40	63
K, % af TS	3,4	2,9	-	-	-	-	4,5	-	4,9
P, % af TS	1,3	0,7	-	-	-	-	0,8	-	1,0
N, % af TS	4,0	4,9	-	-	-	-	3,3	-	2,8
C, % af TS	44	43	-	-	-	-	39	-	32
H, % af TS	6,1	6,1	-	-	-	-	5,1	-	4,3
S, % af TS	0,5	0,4	-	-	-	-	0,5	-	0,6
Cl, % af TS	1,6	1,7	-	-	-	-	3,1	-	4,3
Brændværdi, MJ/kg TS	16	18	-	-	-	-	17	-	15

\* VS repræsenterer her det VS der er tilført pilot-biogasanlægget og ikke det VS der er målt i afløbet fra pilot-biogasanlægget.

### 3.6.4 Korrelation mellem metanudbytte og metanpotentiale

Metanudbyttet af biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation er i praksis umuligt at bestemme i et fuld-skala biogasanlæg, idet disse altid drives med en blanding af forskellige former for affald og gylle. Metanudbyttet kan i stedet bestemmes i et pilot-biogasanlæg, som det er gjort for en række biomasser fra kildesorteret organisk dagrenovation i nærværende projekt. Disse bestemmelser er imidlertid yderst ressourcekrævende. Det er derfor relevant at undersøge, om de målte eller beregnede biogaspotentialer, der er relativt nemme at etablere, korrelerer med de i pilot-biogasanlægget opnåede metanudbytter. Figur 3.6-3 viser metanudbyttet på pilot-biogasanlægget som funktion af de i laboratoriet målte biogaspotentialer og som funktion af beregnede potentialer med udgangspunkt i henholdsvis komponentsammensætningen og i de målte indhold af grundstofferne C, H og O (sidstnævnte bestemt indirekte). Figur 3.6-4 viser de tilsvarende plot for metanudbyttet tillagt restmetanpotentialt målt på DTU.

Figur 3.6-3 og figur 3.6-4 viser, at der ingen korrelation er mellem målte metanudbytter og målte metanpotentiale. De målte metanudbytter varierer stort set kun mellem 300 og 400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, mens de målte metanpotentiale varierer mellem 300 og 550 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. For de beregnede metanpotentiale er korrelationen heller ikke tydelig, men dette skyldes primært at alle observationer stort set falder inden for et interval på kun 80 Nml CH<sub>4</sub>/g VS for beregningerne baseret på komponenter og ca. 150 Nml CH<sub>4</sub>/g VS for beregninger baseret på de målte grundstoffer. Relationerne forbedres ikke væsentligt ved at inkludere restmetanmængden.



De målte metanudbytter falder stort alle i intervallet 300 - 400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Et fornuftigt estimat på metanudbyttet, ved bioforgasningsbetingelser som i pilot-biogasanlægget, kan derfor fås ved blot at måle VS i biomassen. Figur 3.6-5 viser, at der er en delvist korrelation med EFOS-indholdet inden for dette interval, således biomasser med et EFOS indhold på kun 85% af VS har en tendens til at give metanudbytter i den lave ende af intervallet 300 - 400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, mens biomasser med et højt EFOS-indhold på 95% af VS har en tendens til at give metanudbytter i den høje ende af intervallet 300 - 400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Dette er den bedste model, der på det foreliggende grundlag kan etableres, for estimering af metanudbyttet for biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation. Men det understreges at korrelationen er svag og kun bygger på kun 11 observationer hvoraf 1 afviger.

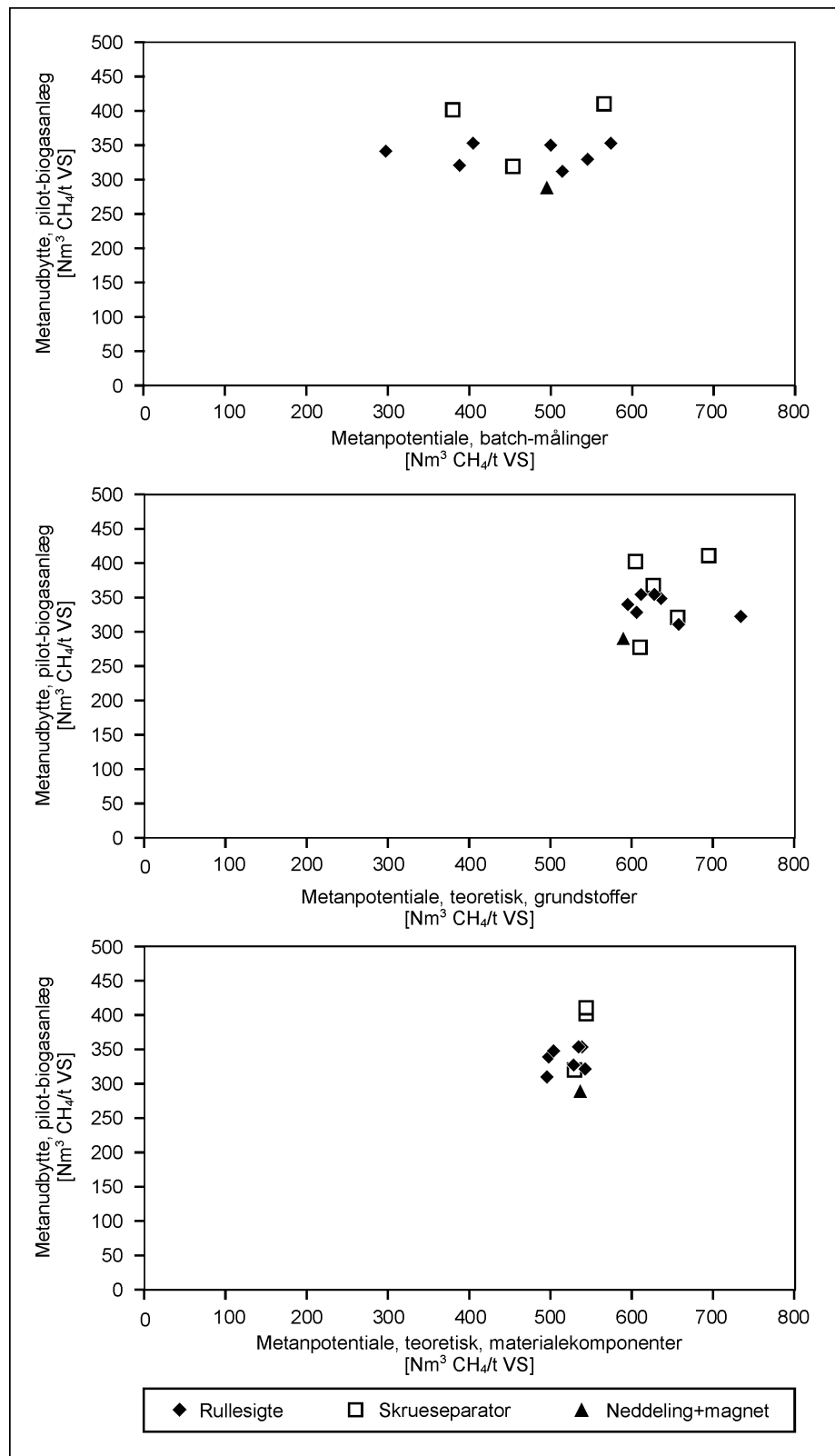
### 3.6.5 Nedbrydningsgrad

Det organiske stofs omsætning i pilot-biogasanlægget kan estimeres på flere måder: dels ud fra en massebalance over tilført og fraført VS, dels ud fra betragtninger over konservative parametres koncentration i biomassen, der tilledes, og i den afgassede biomasse. Ændringer i koncentrationen af for eksempel K, P, Cl og aske kan benyttes til at beregne fjernelsen af VS. Begge fremgangsmåder er dog behæftet med væsentlig usikkerhed.

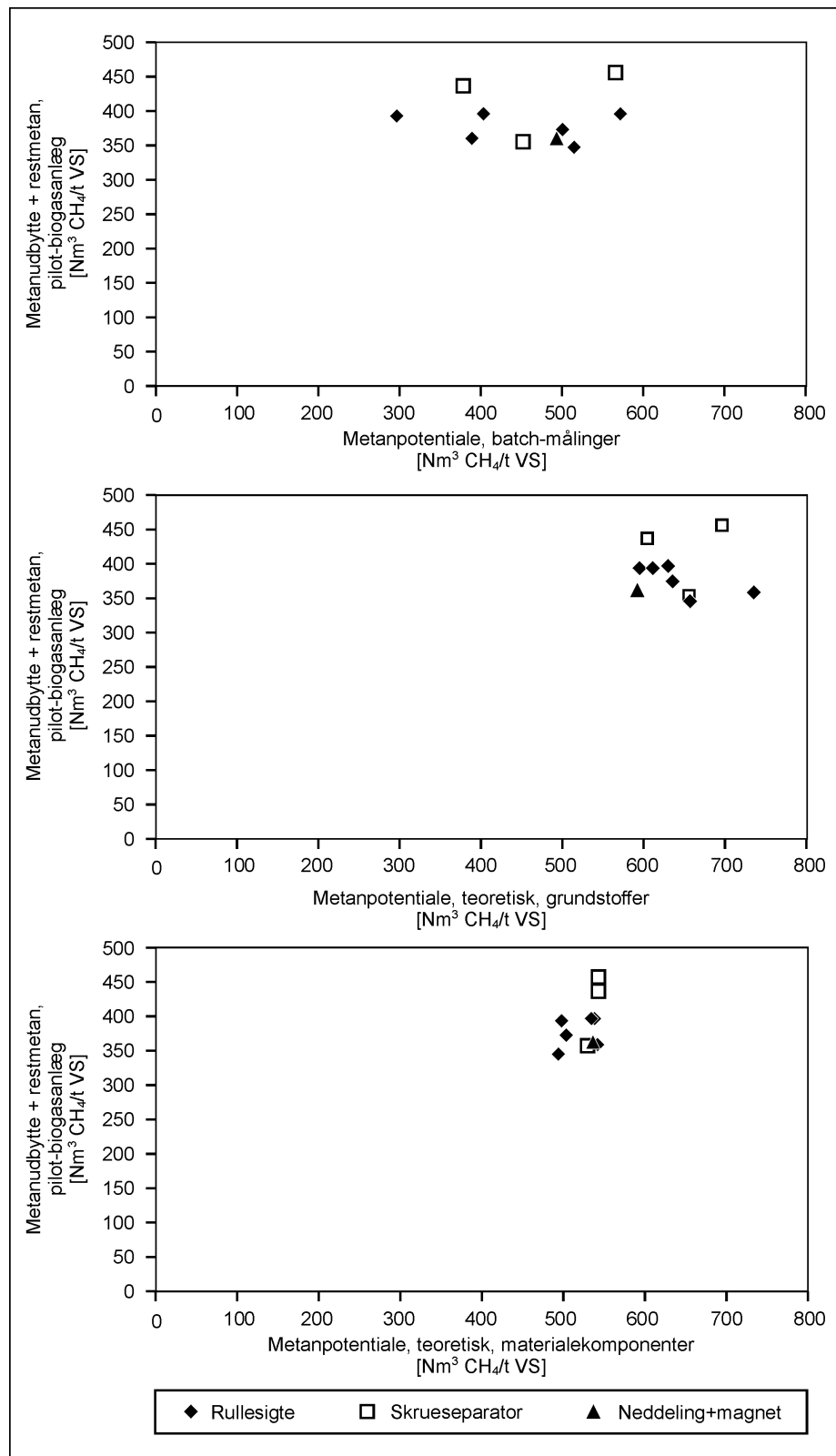
På basis af VS-massebalancer etableret for 14 forsøg med bioforgasning i pilot-biogasanlæg er VS-nedbrydningsgraden beregnet til 74-89% med et gennemsnit på 80% +/- 4% udtrykt som absolut standardafvigelse. Ud fra K og Cl er VS-nedbrydningsgraden i 4 tilfælde bestemt til 77-94% med en samlet værdi på omkring 87%.

En VS-nedbrydning på 75%, som omsættes fuldt ud til biogas, svarer til et metanudbytte på 396 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, hvilket er ca. 15% højere end det faktisk målte gennemsnit på 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS.

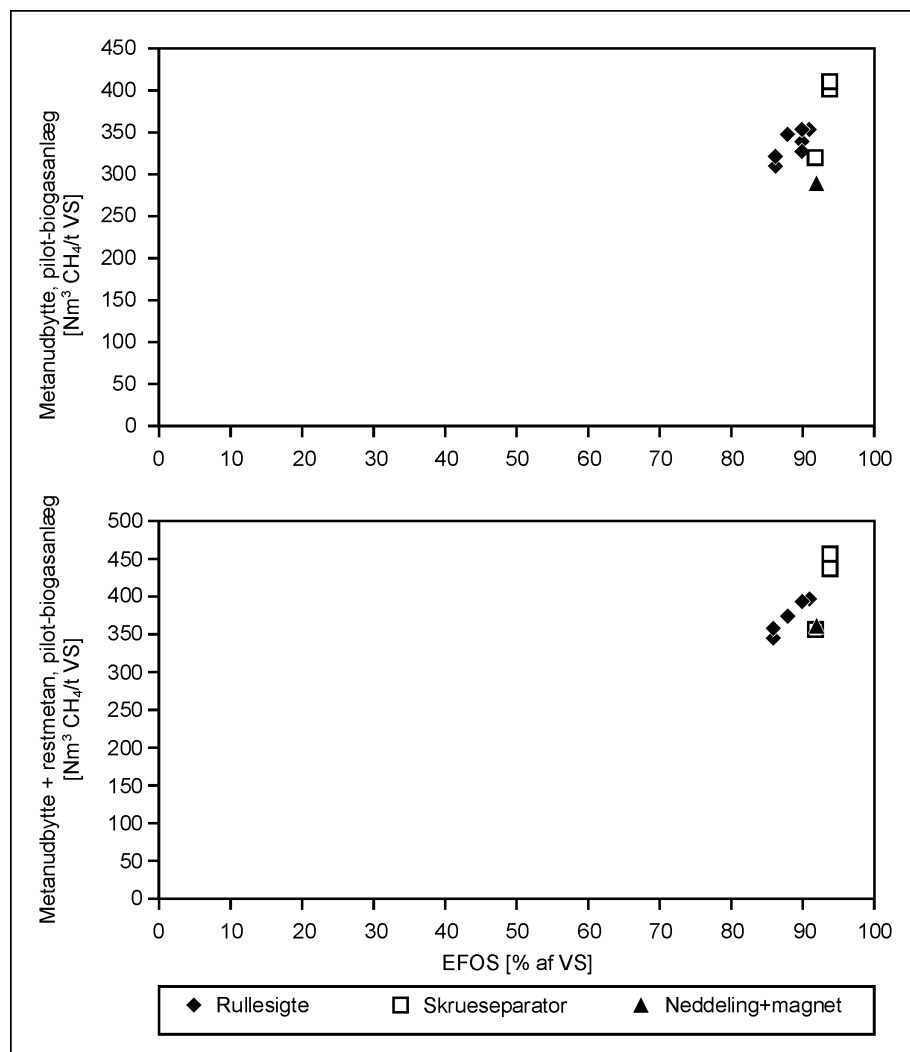
De gennemførte sammenligninger mellem VS-fjernelse, ændringer i konservative parametres koncentrationen før og efter bioforgasningen samt det faktisk målte metanudbytte stemmer rimeligt overens, hvilket betyder at de gennemførte målinger i al overvejende grad er konsistente.



Figur 3.6-3 Metanudbytte som funktion af målte og beregnede metanpotentialer



Figur 3.6.-4 Metanudbytte samt restmetan som funktion af målte og beregnede metanpotentiale



Figur 3.6-5 Metanudbytte som funktion af EFOS i biomassen.

### 3.6.6 Metanudbytte: sammenfatning

Metanudbyttet for biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation bestemt for 14 prøver ved bioforgasning i pilot-biogasanlæg varerede i det væsentlige mellem 300-400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, med et gennemsnit på 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Variationen kunne ikke henføres til forskelle i geografisk område, fælles og individuelle skraldespande og ej heller til forbehandlingsteknologien.

De målte metanudbytter korrelerede ikke med målte biogaspotentialer og heller ikke på brugbar måde med beregnede biogaspotentialer. Metanudbyttet kan derfor bedst og nemmest relateres til VS i biomassen, når det drejer sig om forbeholdt organisk dagrenovation. Biogasudbyttet er i intervallet 300-400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS delvist korreleret med EFOS i biomassen; jo højere den enzymfordøjelige del er, des større metanudbytte synes sandsynlig. Korrelationen bygger dog kun på få målinger og må kun opfattes som en indikation.

Bioforgasningen i pilot-biogasanlægget omsatte mellem 74 og 89 % af VS-indholdet i biomassen med et gennemsnit omkring 80%. Den afgassede biomasse har et potentiale for yderligere at danne 40-50 Nml CH<sub>4</sub>/g VS oprindeligt tilført pilot-biogasanlægget svarende til yderligere 10-15% metan.

Metan udgjorde 59-66% (gennemsnit 62%) af den dannede biogas, hvilket indikerer at et metanudbytte på 340 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g VS svarer til en biogasmængde på 515-575 Nm<sup>3</sup>/g VS.

### 3.7 Relation mellem potentialer, udbytte, VS og kildesorteret organisk dagrenovation

På baggrund af de præsenterede data for biomassens sammensætning, de målte metanpotentialer og de målte metanudbytter er der i tabel 3.7-1 sammenstillet typiske tal for metan-mængder, repræsenterende forskellige basis-enheder og forskellige steder i systemet. Det er således muligt at se, hvorledes typiske metanpotentialer målt i laboratoriet og udtrykt på VS-basis hænger sammen med metanudbyttet målt i pilot-biogasanlægget og udtrykt i forhold til vådt kildesorteret organisk dagrenovation, som det indsamles. Hvor data ikke var signifikant forskellige for de forskellige forbehandling er der benyttet gennemsnitstal, ligesom der ikke er opdelt efter geografisk områder, selv om visse forskelle tidligere er påvist. Det ses at de største forskelle er relateret til hvor meget organisk stof, der fjernes ved forbehandlingen.

Tabel 4.7-1: Typetal for metan for forskellige forbehandling

<b>Typetal: metan, CH<sub>4</sub></b>	Neddeling+magnetseparatorin g	Rullesigte	Skrueseparator
Teoretisk metanpotentiale, biomasse, komponent-baseret, Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS	530	530	530
Metanpotentiale, biomasse, målt i batch, 50 døgn, Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS	465	465	465
Metanudbytte-VS, biomasse, pilot-biogasanlæg, Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS	340	340	340
Metanudbytte-TS, biomasse, pilot-biogasanlæg, Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton TS	306	290	290
Metanudbytte-biomasse, pilot-biogasanlæg, Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton våd biomasse	92	87	72
Metanudbytte-affald, pilot-biogasanlæg, Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton vådt affald*	91	58	45

\*Indsamlet vådt kildesorteret organisk dagrenovation

Idet det antages, at metanindholdet udgør 62 volumenprocent af biogassen er tilsvarende typiske tal for biogas (metan + kuldioxid) præsenteret i tabel 7.4-2. Den benyttede metanprocent er gennemsnittet for gassammensætningen målt i pilot-biogasanlægget.

Tabel 4.7-2: Typetal for biogas for forskellige forbehandling

<b>Typetal: biogas, CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub></b>	Neddeling+magnetseparatorin g	Rullesigte	Skrueseparator
Teoretisk biogaspotentiale, biomasse, komponent-baseret, Nm <sup>3</sup> gas/ton VS	855	855	855
Biogaspotentiale, biomasse, målt i batch, 50 døgn, Nm <sup>3</sup> gas /ton VS	750	750	750
Biogasudbytte-VS, biomasse, pilot-biogasanlæg, Nm <sup>3</sup> gas /ton VS	550	550	550
Biogasudbytte-TS, biomasse, pilot-biogasanlæg, Nm <sup>3</sup> gas/ton TS	490	465	465
Biogasudbytte-biomasse, pilot-biogasanl., Nm <sup>3</sup> gas /ton våd	148	140	116

biomasse			
Biogasudbytte-affald, pilot-biogasanl., Nm <sup>3</sup> gas /ton våd affald*	147	94	71

\* Indsamlet våd kil desorteret organisk dagrenovation

## 4 Miljøvurdering: Energi, drivhusgasser og næringsstoffer

I dette afsnit gennemføres beregninger af de ressourcemæssige og miljømæssige aspekter af bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation. For sammenlignelige systemer, men forskellige geografiske og tekniske udformninger gennemføres beregninger af den samlede energibesparelse (MJ primærenergi), besparelse i emissionen af drivhusgasser (CO<sub>2</sub>-ækvivalenter) og besparelse i produktion af kunstgødning (kg N, P og K).

Indledningsvist omtales behovet for at kunne beregne de ressourcemæssige og miljømæssige konsekvenser, hvorefter hovedelementerne i DTU-Biogasmodellen præsenteres. Efterfølgende præsenteres de væsentligste resultater af en lang række gennemførte beregninger, idet forskelle mellem geografiske områder, kildesorteringssystemer og forbehandling belyses. Der gennemføres en nærmere analyse af hvor i systemet energi forbruges og spares, og konsekvenserne af eventuelle ændringer i teknologi vurderes.

Beregningerne gennemføres med udgangspunkt i 1 ton våd kildesorteret organisk dagrenovation. Først i sidste afsnit sættes disse beregninger i forhold til hvor meget der kildesorteres pr. person.

DTU-BIOGASMODELLEN og samtlige gennemregnede scenarier er beskrevet i detaljer i Bilag 4.

### 4.1 Introduktion til beregningsmodel

Bioforgasning af organisk dagrenovation involverer separat indsamling af den organiske dagrenovation ved kilden samt en række teknologiske procestrin som forbehandling, bioforgasning, forbrænding af rejekt og oplagring af forgasset materiale. Den kildesorterede organiske dagrenovation vil eventuelt afhænge af kilden og de benyttede kildesorteringskriterier, ligesom de enkelte procestrin kan udformes teknologisk forskelligt. Bioforgasning af organisk dagrenovation er således ikke en bestemt teknologisk løsning men potentielt mange forskellige teknologiske løsninger. Udfra ønsket om en konsistent beskrivelse af disse alternative teknologiske løsninger samt muligheden for at simulere ændringer i de enkelte delprocesser er det opbygget en excell-baseret model: DTU-BIOGASMODEL (vs 1.00). Modellen beregner for et defineret system masseflow, energiforbrug og -produktion, besparelser i emission af drivhusgasser samt besparelser i næringsstoffer med hensyn til N, P og K.

I modellen indgår forbrænding af rejektet fra forbehandlingen af den kildesorterede organiske dagrenovation. Modellen kan derfor også beregne konsekvenserne for en løsning med forbrænding uden bioforgasning af den organiske dagrenovation.

Det eksisterende datamateriale tillader ikke en egentlig modellering af selve kildesorteringssystemet, indsamlingen samt forbehandlingen af den

kildesorterede organiske dagrenovation. Antal af variable og deres kombinationer er stort og deres generelle funktionelle sammenhæng kan ikke bestemmes ud fra de eksisterende data. Dette betyder, at modellens første trin er baseret på eksemplariske datasæt for specifikke kombinationer af kildesorteringskriterier, indsamlingssystem og forbehandling. For eksempel, må der vælges, med udgangspunkt i de i nærværende undersøgelse præsenterede data, en kombination af kildesorteringskriterier og indsamlingssystem, som de aktuelt er beskrevet for Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg, samt forbehandlingsteknologi, som de pågældende affaldstyper nu er blevet forbehandlet på. De efterfølgende trin i modellen er generelt funktionelle, idet de baserer sig på grundlæggende karakteristiske parametre som brændværdi, metanpotentiale og lignende.

DTU-BIOGASMODEL beregner masseflow, idet disse er grundlaget for enhver systembetragtning, energi, drivhusgasser og næringsstoffer. Disse ressource- og miljøparametre er valgt, fordi de repræsenterer de vigtigste ressource- og miljømæssige parametre ved vurdering af bioforgasning. Det betyder, at modellen i sin nuværende udformning hvad angår ressourcer og miljø ikke vurderer:

- Lugt
- Andre emissioner end metan fra forbrænding af gas og rejekt (og kildesorteret organisk dagrenovation i forbrændingsscenariet)
- Slagger og røggasrensingsprodukter fra forbrænding af rejekt (og kildesorteret organisk dagrenovation i forbrændingsscenariet)
- Værdien af tilførslen af organisk stof til jorden som funktion af anvendelsen af afgasset biomasse
- Emissioner fra transport bortset fra kuldioxid
- Om de beregnede substitutioner for energi (el, varme) og kunstgødning i realiteten kan effektiviseres

## 4.2 DTU-BIOGASMODELLEN

DTU-BIOGASMODELLEN er kort beskrevet i det følgende, idet det betragtede system beskrives, de teknologiske specifikationer opsummeres og grundlaget for de miljømæssige beregninger præsenteres.

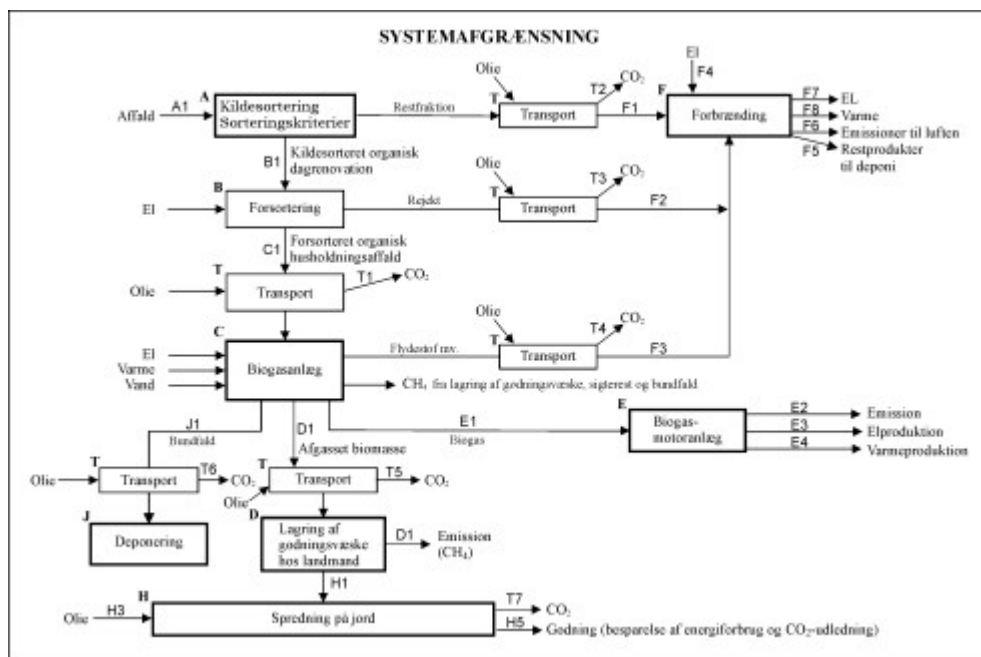
### 4.2.1 Systembeskrivelse

DTU-BIOGASMODEL betragter et system, som beskrevet i figur 4.2-1. Modellen præsenteret i Bilag 4 har en række yderligere muligheder, der ikke benyttes til de her gennemførte beregninger og som ikke beskrives i det følgende.

Udgangspunktet er 1 ton kildesorteret organisk dagrenovation med en given sammensætning. Affaldet rutes via indsamling, transport og forbehandlingsanlæg til biogasanlæg, hvad angår biomassen, mens rejektet føres til forbrænding. Fra biogasanlægget udtages også bundfald, der deponeres, og flydestof, der tilføres forbrændingsanlægget. Disse mængder er dog i de givne beregninger meget små. Biogassen, der produceres, benyttes i en gasmotor. Den afgassede biomasse oplagres og benyttes som gødning på marker.



Undervejs beregnes alle energiforbrug og energiproduktioner, ligesom mængden af næringsstoffer, der via den afgassede biomasse tilføres marken, antages at substituere kunstgødning, der ellers skulle produceres og transporteres.



Figur 4.2.1 Systemskitse for DTU-BIOGASMODEL.

#### 4.2.2 Tekniske specifikationer

De tekniske specifikationer og antagelser er med udgangspunkt i 1 ton våd kildesorteret dagrenovation:

- Den kildesorterede organiske dagrenovation specificeres ud fra data for det undersøgte affald i Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle eller Aalborg. Der skelnes ikke mellem affald fra fælles og individuelle skraldespande. Dele af affaldet kan efter nærmere specifikation rutes direkte til forbrænding, hvis dette ønskes. Denne mulighed kan benyttes til at undersøge eventuelle ændringer i kildesorteringskriterierne.
- Indsamlingen af den kildesorterede organiske dagrenovation beskrives ved et dieselforbrug pr. ton våd indsamlet dagrenovation og antages som udgangspunkt at kræve dobbelt så meget energi pr. ton som indsamling af restaffaldet. Data for sidstnævnte stammer fra upublicerede data indsamlet af DTU.
- Forbehandlingen specificeres som fordelingen af våd vægt, TS, VS, vand, N, P og K mellem biomasse og rejkt for de kombinationer af kildesorteret organisk dagrenovation og forbehandlingsteknologi, der er indgået i nærværende undersøgelse. Fiktive forbehandlingsteknologier kan også inddrages, blot fordelingen af ovennævnte parametre kan specificeres. Forbehandlingens forbrug af el specificeres på baggrund af data fra rullerisigten på Knudmoseværket og skrueseparatoren i Vaarst-Fjellerad.
- Biogasanlægget inklusiv hygiejnisering, efterafgasningstank og lagertanke beskrives ved en mængde metan produceret pr. t VS tilført. Denne fastsættes som et metanpotentiale for biomassen multipliceret med en nedbrydningsgrad. I referencescenariet er benyttet et metanpotentiale på  $450 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{tons VS}$  og en nedbrydningsgrad på

75%. Forbrug af el, varme og vand er fastsat ud fra data fra danske biogasfællesanlæg.

- Rejektet føres til forbrændingsanlæg og energien benyttes som udgangspunkt til el og varme. Brændværdien af rejektet er baseret på målinger fra de pågældende forbehandlingsanlæg og rejektets vandindhold. Forbrændingsanlæggets forbrug af el baserer sig på grønne regnskaber fra danske forbrændingsanlæg.
- Biogassen afbrændes i gasmotor med fremstilling af el og som udgangspunkt også varme. Emissionen af uforbrændt metan antages at være 3% af metanmængden.
- Lagringen af gødningsvæsken hos landmand antages som udgangspunkt at ske ideelt, det vil sige uden emission af metan.
- Transporten beskrives som dieselforbrug pr. ton og km og fastsættes på baggrund af erfaringstal for lastbiler med stor fyldningsgrad. Som udgangspunkt benyttes følgende afstande til forbehandlingsanlæg: 25 km, fra forbehandlingsanlæg til biogasanlæg: 0 km, fra biogasanlæg til forbrændingsanlæg: 25 km og fra biogasanlæg til landmand: 12 km.

#### 4.2.3 Ressource- og miljøparametre

De ressourcemæssige og miljømæssige parametre opgøres efter følgende retningslinjer:

- Energi omregnes fra el, varme og diesel til primærenergi målt som megajoule (MJ), hvilket betyder at kvaliteten af energien tages i betragtning. Primærenergi udtrykker således alle direkte og indirekte energiforbrug der medgår til at producere den el, varme og diesel, der forbruges eller spares. Omregningerne følger principperne i UMIP, 1997. Alle energiudnyttelsesanlæg antages som udgangspunkt at være effektive og med høje virkningsgrader. For eksempel antages for både gasmotor og forbrændingsanlæg at den samlede energivirkningsgrad er 85%, med ca. 22% til el ved affaldsforbrænding og 38% til el ved gasmotoren.
- Drivhusgasemissionerne beregnes ud fra forbrænding af fossile brændsler, dvs. olie, kul o.l. der benyttes i fremstillingen af diesel, el og varme. Kuldioxid stammende fra organisk affald tillægges ingen drivhusgasemission, da det organiske affald bygger på fotosyntese. Metan, der emitteres, tillægges en drivhusgasemission der er 25 gange kuldioxids, idet alle drivhusgasser omregnes til CO<sub>2</sub>-ækvivalenter.
- Næringsstofferne opgøres som kg N, P og K, idet næringsstofferne konservativt følger biomassen efter forbehandlingen. Det antages at kun 60% af N tilføres markerne, idet en del tabes som ammoniak og noget bindes utilgængeligt for planter. P og K antages ligeså tilgængeligt som P og K i kunstgødning. Næringsstofferne antages at substituere tilsvarende mængder N, P og K i kunstgødning. Dette giver også en energimæssig besparelse, idet udvindingen, oparbejdningen og transporten af kunstgødningen spares. Denne besparelse indgår i energiopgørelsen og baserer sig på generelle tal om kunstgødningsproduktion.

#### 4.3 Gennemførte beregninger

Opgørelsen af energi, drivhusgasser samt N, P og K er gennemført for ca. 80 scenarier som beskrevet i Bilag 4. Udvalgte resultater er præsenteret i det følgende.

#### 4.3.1 Geografiske og systemmæssige vurderinger

Med udgangspunkt i de i afsnit 4.2 præsenterede specifikationer er besparelserne i energi, drivhusgasser og næringssalte beregnet for kildesorteret organisk dagrenovation fra de 5 geografiske områder forbehandlet i nærværende undersøgelse på forskellige forbehandlingsanlæg. Samme beregninger er gennemført for forbrænding af det samme affald sammen med restaffaldet. Resultaterne er præsenteret i tabel 4.3-1.

Energibesparelsen er den samme om forbehandlingen sker på rullsigte eller skrueseparator og er i øvrigt ikke signifikant forskellig fra forbrænding af den organiske dagrenovation for Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding og Vejle, mens der er en lille fordel på bioforgasning i Aalborg (ca. 9%).

For drivhusgasserne er besparelsen ens ved bioforgasning og forbrænding for alle de undersøgte scenarier. Dog opnås der ca. 12 % mindre besparelse i drivhusgasemission ved bioforgasning frem for forbrænding i Grindsted. Dette skyldes udslip af metan.

Besparelsen i N, P og K forekommer ikke ved forbrænding og er ca. 5-7 kg N, 0,5-1 kg P og 1,5-2 kg K for bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg. I Grindsted er besparelsen knap 100 % større, da rejehtmængden her er forsvindende.

#### 4.3.2 Energiforbrug og -besparelser

Energibesparelsen er væsentlig og også i stor udstrækning styrende for besparelsen i drivhusgasemissionen. Der er derfor foretaget en nærmere opgørelse af hvilke delprocesser, der forbruger eller producerer energi. Resultatet heraf er for de samme kombinationer som præsenteret i tabel 4.3-1 opgjort i tabel 4.3-2.

Tabel 4.3-1: Besparelse i energi (primærenergi), drivhusgasser og næringsstoffer pr. ton kildesorteret organisk dagrenovation under antagelse af at alle energianlæg fremstiller både el og varme. Ved forbrænding kildesorteres den organiske dagrenovation ikke, men indsamles med restaffaldet.

Pr. ton våd kildesorteret organisk dagrenovation	Energi	Drivhusgasser	Næringsstoffer , kg		
	MJ*	Kg CO <sub>2</sub> -ækv.	N	P	K
Grindsted					
- Neddeling og bioforgasning	3691	256	10,8	1,3	2,9
- Forbrænding	3495	287	0	0	0
Hovedstadsområdet					
- Rullesigte og bioforgasning	3350	248	6,4	0,8	1,9
- Skrueseparator og bioforgasning	3220	241	5,6	0,5	1,6
- Forbrænding	3165	260	0	0	0
Kolding					
- Rullesigte og bioforgasning	3588	271	6,2	0,8	1,8
- Skrueseparator og bioforgasning	3651	275	6,4	0,6	1,9
- Forbrænding	3524	289	0	0	0
Vejle					
- Rullesigte og bioforgasning	3678	274	7,4	0,9	1,9
- Skrueseparator og bioforgasning	3686	281	5,4	0,5	1,6
- Forbrænding	3563	292	0	0	0
Aalborg					
- Rullesigte og bioforgasning	3594	272	5,5	0,7	1,4
- Skrueseparator og bioforgasning	3468	262	5,6	0,5	1,4
- Forbrænding	3207	263	0	0	0

\* MJ er megajoule: 1 liter olie svarer til ca. 36 MJ

Tabel 4.3-2 viser at bioforgasningen af biomassen og forbrændingen af rejektet stort set bidrager med lige stor produktion af energi. Forskellene, der observeres i nogle af tilfældene, afhænger af fordelingen af tørstof og vand ved forbehandlingen. Den største samlede energiproduktion fås, når mest tørstof går i rejektet og mest vand i biomassen. Eller sagt med andre ord, der fås samlet set mest energi ved at forbrænde tørstoffet, men det koster energi at fordampe vandet. Det bemærkes, at energibesparelsen ved at substituere kunstgødning har samme størrelse som energiforbruget til indsamling og transport af affaldet. Hver for sig - dog med modsat fortegn - udgør de dog kun ca. 10% af den samlede energiproduktion ved bioforgasning af biomassen og forbrænding af rejektet. Dette indikerer, at optimering af energibesparelsen ved bioforgasning bør fokusere på optimering af gasproduktionen, gasudnyttelsen og forbrændingen af rejektet

Tabel 4.3-2: Energiforbrug (positiv) og energibesparelse (negativ) opgjort som primærenergi pr. ton kildesorteret organisk dagrenovation indsamlet i forskellige geografiske områder og behandlet på forskellig vis under antagelse af at alle energianlæg fremstiller både el og varme. Ved forbrænding kildesorteres den organiske dagrenovation ikke, men indsamles med restaffaldet.

Pr. 1 ton vådt kildesorteret organisk dagrenovation	Energi (MJ* pr. ton)					
	Indsam + transp.	Forbehandling	Bio-gas-anlæg	Forbrænding	Subst. gødning	I alt
Grindsted						
- Neddeling og bioforgasning	368	0 <sup>a</sup>	-3399	0	-659	-3691
- Forbrænding	179	0	0	-3674	0	-3495
Hovedstadsområdet						
- Rullesigte og bioforgasning	381	130	-1990	-1470	-401	-3350
- Skrueseparator og bioforgasning	386	72	-1734	-1608	-339	-3220
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165
Kolding						
- Rullesigte og bioforgasning	384	130	-1734	-1983	-386	-3588
- Skrueseparator og bioforgasning	383	72	-1795	-1917	-394	-3651
- Forbrænding	179	0	0	-3703	0	-3524
Vejle						
- Rullesigte og bioforgasning	380	130	-2056	-1677	-455	-3678
- Skrueseparator og bioforgasning	386	72	-1569	-2243	-331	-3686
- Forbrænding	179	0	0	-3742	0	-3563
Aalborg						
- Rullesigte og bioforgasning	380	130	-1667	-2097	-341	-3594
- Skrueseparator og bioforgasning	383	72	-1649	-1934	-340	-3468
- Forbrænding	179	0	0	-3387	0	-3207

\* MJ er megajoule: 1 liter olie svarer til ca. 36 MJ

a: Der er reelt et lille energiforbrug til neddeling og magnetseparering

#### 4.3.3 Teknologiske vurderinger

Beregninger præsenteret i tabel 4.3-1 og tabel 4.3-2 omfatter det teknologiske referencescenario omtalt i afsnit 4.2. Teknologiske systemer, der afviger fra referencescenariet, vil også resultere i ændrede besparelser med hensyn til energi, drivhusgasser og næringsstoffer. Effekterne af sådanne forandringer er beregnet i tabel 4.3-3, som viser konsekvenserne af, at en enkelt parameter er ændret i forhold til det teknologiske referencescenario for kildesorteret organisk dagrenovation indsamlet i Hovedstadsområdet.

Tabel 4.3-3 viser, at overordnet set er den samlede energibesparelse meget robust over for ændringer i det teknologiske system, idet ændringerne i energibesparelsen er lille ved:

- at skrueseparatoren kun giver 7% rejekt mod normalt 30-44 % (+7%)
- at energiomkostningerne ved reduktion af energiforbruget til indsamling af kildesorteret affald halveres og svarer til energiomkostningerne ved indsamling af restaffaldet (+5%)
- at køreafstanden til forbehandlingsstedet øges fra 25 km til 150 km (-9%)
- at biogasproduktionen pr. tons VS øges med 13% (+9%)

Dog vil en ændring i det teknologiske system hvad angår energiudnyttelsen have væsentlige konsekvenser, idet et biogasanlæg med en gasmotor, hvor varmen køles væk vil give en reduktion i energibesparelsen på ca. 23% (-23% ved sammenligning med tallene præsenteret ovenfor).

Tabel 4.3-3: Energiforbrug (positiv) og energibesparelse (negativ) opgjort som primærenergi pr. ton kildesorteret organisk dagrenovation indsamlet i

Hovedstadsområdet behandlet på forskellig vis under varierende teknologiske scenarier. Ved forbrænding kildesorteres den organiske dagrenovation ikke, men indsamles med restaffaldet

Pr. ton våd kildesorteret organisk dagrenovation	Energi (MJ* pr. ton)					
	Indsamling + transp.	Forbehandling	Bio-gas-anlæg	Forbrænding	Subst. gødning	I alt
Hovedstadsområdet						
Referencescenarier:						
- Rullesigte og bioforgasning	381	130	-1990	-1470	-401	-3350
- Skrueseperator og bioforgasning	386	72	-1731	-1608	-339	-3220
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165
Scenario: Skrueseparatoren giver nu kun 7% rejekt med et relativt højt tørstofindhold:						
- Rullesigte og bioforgasning	381	130	-1990	-1470	-401	-3350
- Skrueseperator og bioforgasning	371	72	-2896	-434	-542	-3430
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165
Scenario: Energiforbruget ved separat indsamling reduceres til samme niveau som restaffald:						
- Rullesigte og bioforgasning	237	130	-1990	-1470	-401	-3493
- Skrueseperator og bioforgasning	243	72	-1731	-1608	-339	-3363
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165
Scenario: Transportafstanden til biogasanlægget øges fra 25 til 150 km:						
- Rullesigte og bioforgasning	680	130	-1990	-1470	-401	-3051
- Skrueseperator og bioforgasning	685	72	-1731	-1608	-339	-2921
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165
Scenario: Biogasproduktionen øges med 13 % fra 338 til 383 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS:						
- Rullesigte og bioforgasning	380	130	-2287	-1470	-401	-3648
- Skrueseperator og bioforgasning	386	72	-1988	-1608	-339	-3477
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165
Scenario: Gasmotoren producerer kun el og ingen varme; denne køles bort						
- Rullesigte og bioforgasning	381	130	-1153	-1470	-401	-2513
- Skrueseperator og bioforgasning	386	72	-1010	-1608	-339	-2499
- Forbrænding	179	0	0	-3344	0	-3165

\* MJ er megajoule: 1 liter olie svarer til ca. 36 MJ

#### 4.4 Vurdering af usikkerheder ved beregningerne

De gennemførte beregninger er naturligvis behæftet med nogen usikkerhed, dels hvad angår antagelser vedrørende det overordnede system og de enkelte delprocesser, dels hvad angår de benyttede data.

Vedrørende næringsstofferne vurderes det at usikkerhederne er relative små, idet bioforgasningen på alle punkter er væsentlig bedre end forbrændingen, og mængden af næringsstoffer, der potentielt kan genanvendes, er direkte proportional med indholdet i affaldet og andelen af biomasse opnået ved

forbehandlingen. Disse størrelser er målt i dette projekt på en række prøver og må opfattes som kendte. Selve udnyttelsen af næringsstofferne, det vil sige om den beregnede besparelse i brug af kunstgødning er reel, er næppe heller meget usikker, idet det må antages at langt størstedelen af bioforgasningen af den kildesorterede organiske dagrenovation vil ske på biogasfællesanlæg uden efterfraseparering af fiberfraktionen inden udbringningen af den afgassede biomasse.

Vedrørende de energimæssige beregninger vurderes de største usikkerheder at være knyttet til energianlæggenes funktion. Det er altafgørende at energianlæggene både producerer el og varme og at den producerede energi rent faktisk substituerer anden energi. Det er således vigtigt at energieffektiviteten er høj og besparelsen er reel. Dette vil ikke altid være tilfælde og det må anbefales at disse aspekter nøje vurderes i det rette lokale og regionale perspektiv. Usikkerhederne knyttet til de tekniske systemer, herunder hvor meget biogas der produceres, er af betydning men næppe afgørende. Skønsomt er usikkerhederne af samme størrelse som de observerede forskelle.

Vedrørende drivhusgasserne er usikkerhederne i det væsentlige analoge til usikkerhederne vedrørende energibesparelserne. Metans særlige bidrag til drivhusgasserne er primært knyttet til udslippet ved gasmotoren og i mindre grad til opbevaringen af afgasset kildesorteret organisk dagrenovation. Usikkerheden omkring det faktiske metanudslip er ikke udslagsgivende for betragtningerne om drivhusgasserne.

Der er i undersøgelserne konstateret store lokale og tidsmæssige variationer både i affaldets sammensætning, forbehandlings effektivitet, i metanpotentialer og delvist også i pilot-biogasanlæggets metanudbytte. Men da projektet har omfattet mange prøvetagninger, karakteriseringer og forsøg vurderes det, at de gennemførte gennemsnitsbetragtninger bygger på et godt grundlag og derfor på rimelig vis repræsenterer danske forhold hvad angår bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation.

#### 4.5 Perspektivering

De ovenfor gennemførte vurderinger er baseret på 1 ton våd kildesorteret organisk dagrenovation. Antages det, at der indsamles 60 kg vådt kildesorteret organisk dagrenovation pr. person om året (denne størrelse er vurderet som en typisk værdi baseret på rapporter publiceret inden 2001, bilag 1), svarer de beregnede energibesparelser til ca. 200-250 MJ, 15-17 kg CO<sub>2</sub>, 0,3-0,7 kg N, 0,03-0,08 kg P og 0,08-0,17 kg K pr. person om året. Energibesparelsen svarer i runde tal til 5-6 l olie, hvilket ikke er systematisk højere en besparelsen ved at forbrænde det organiske affald.

Den eneste generelle systematiske forskel, sammenlignet med forbrænding, er besparelsen af N, P og K ved bioforgasningsløsningen og her er besparelsen størst ved de teknologier, der resulterer i mindst rejkt ved forbehandlingen. Besparelsen svarer om året pr. person til i størrelsesordenen en pose kunstgødning, der vejer ca. 1-2,5 kg afhængig af forholdene og kunstgødningstypen.

Indsamles der for hver enkelt dansker 60 kg kildesorteret organisk dagrenovation svarende til 310 000 tons udgør dette om året ca. 2500 tons N,

250 tons P og 520 tons K, hvilket er hhv. 1,0 %, 1,4 % og 0,8% af Danmarks forbrug af kunstgødning (Statistisk Tiårs Oversigt 2001).



Tabel 4.3-4: Besparelse i energi, drivhusgasser og næringsstoffer pr. person om året ved kil desortering af 60 kg våd organisk dagrenovation pr. person om året under antagelse af at alle energianlæg fremstiller både el og varme. Ved forbrænding kil desorteres den organiske dagrenovation ikke, men indsamles med restaffaldet.

Pr person årligt ved 60 kg våd kildesorteret organisk dagrenovation	Energi	Drivhusgasser	Næringsstoffer [kg]		
	MJ	Kg CO <sub>2</sub> -ækv.	N	P	K
Grindsted					
- Neddeling og bioforgasning	221	15	0,65	0,08	0,17
- Forbrænding	210	17	0	0	0
Hovedstadsområdet					
- Rullesigte og bioforgasning	201	15	0,38	0,05	0,11
- Skrueseperator og bioforgasning	193	14	0,34	0,03	0,10
- Forbrænding	190	16	0	0	0
Kolding					
- Rullesigte og bioforgasning	215	16	0,37	0,05	0,11
- Skrueseperator og bioforgasning	219	17	0,38	0,04	0,11
- Forbrænding	211	17	0	0	0
Vejle					
- Rullesigte og bioforgasning	221	16	0,44	0,05	0,11
- Skrueseperator og bioforgasning	221	17	0,32	0,03	0,10
- Forbrænding	214	18	0	0	0
Aalborg					
- Rullesigte og bioforgasning	216	16	0,33	0,04	0,08
- Skrueseperator og bioforgasning	208	16	0,34	0,03	0,08
- Forbrænding	192	16	0	0	0

\* MJ er megajoule: 1 liter olie svarer til ca. 36 MJ



## 5 Konklusion

Kildesorteret organisk dagrenovation fra fælles og individuelle skraldespande fra kildesorteringsordningerne i Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg er over en 11 måneders periode hver to gange blevet behandlet på forskellige forbehandlingsanlæg: neddeling + magnetseparering, rullesigte og skrueseparator. I enkelte tilfælde er den tidsmæssige variation belyst med 6 prøver over perioden. Det forbehandlede affald (kaldet biomassen) og rejektet er karakteriseret fysisk og kemisk og metanpotentialet er målt i laboratoriet over 50 døgn. I 14 tilfælde er biomassen blevet bioforgasset på et pilot-biogasanlæg, idet metanudbyttet er bestemt efter stabil drift er opnået. Den afgassede biomasse er endvidere karakteriseret med hensyn til kemisk sammensætning og restmetanpotentiale.

### 5.1 Den kildesorterede organiske dagrenovation

Den kildesorterede organiske dagrenovations sammensætning varierer mellem de undersøgte geografiske områder, men forskellene synes forklarlige ud fra forskelle i kildesorteringsvejledning og i poser anvendt til indsamlingen: Kattegrus, potteplanter og lignende inkluderet i den grønne fraktion synes at øget askeindholdet i den kildesorterede organiske dagrenovation, og anvendelsen af plastposer i indsamlingen øger indholdet af plast, også udover den plastmængde, der skyldes selve indsamlingsposerne. I enkelte tilfælde har indholdet af plast været meget højt (>10%). Set i forhold til det organiske stof (målt som glødetab minus plast) er der ingen systematiske forskelle mellem affaldet fra fælles og individuelle skraldespande, fra forskellige kildesorteringsordninger eller fra forskellige indsamlingssystemer. Det bør dog bemærkes at der er væsentlig variation i sammensætningen af det organiske stof.

### 5.2 Forbehandling

Af forbehandlingsteknologierne udmærker neddeling + magnetseparering sig ved i alle tilfælde at give de højeste andele af alle parametre i biomassen, idet rejektets vægt er mindre end 1 %. Neddeling + magnetseparering er dog kun mulig på meget rent kildesorteret organisk dagrenovation og har kun kunnet gennemføres for affald fra Grindsted og Hovedstadsområdet. Til sammenligning giver rullesigten i gennemsnit 34% rejekt og skrueseparatoren 41% målt som vådvægt. For rullesigten og skrueseparatoren var der ingen væsentlige forskelle i forbehandlingseffektiviteter mellem fælles og individuelle skraldespande. Signifikante forskelle er observeret for affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet på rullesigte, idet biomassens andel af indholdet i den kildesorterede organiske dagrenovation her er størst for vådvægt, tørvægt, tørt organisk stof og vand, sammenlignet med affald fra de øvrige geografiske områder og samtlige forbehandlinger på rullesigte og skrueseparator. At den kildesorterede dagrenovation forbehandlet på rullesigten udmærker sig sammenlignet med øvrige kombinationer af geografi og forbehandling (kun rullesigte og skrueseparator) kan skyldes, at netop affaldet fra Hovedstadsområdet var det reneste (sammenlignet med affald fra

Kolding, Vejle, Aalborg) og rullesigten qua sin funktionsmåde lader mere falde gennem sigten til biomassefraktionen. Forbehandlingseffektiviteterne varierer betydeligt, med relative standardafvigelser i runde tal på 10-15%, og eventuelle øvrige, men mindre forskelle i forbehandlingseffektivitet afhængig af geografi, skraldespandssystem og forbehandlingsteknologi har ikke kunnet konstateres. Vigtigst er det at notere, at mængden af tørstof, der forbehandles til biomassen, kan variere væsentligt over tid.

Biomassen fra skrueseeparatoren er meget ren om end små plaststumper visuelt kan identificeres, men vægtmæssigt er det meget lidt (skønsmæssigt < 0,5%). Rullesigten resulterer i mere plast og større stykker papir i biomassen. Rejektet består for begge forbehandlingers vedkommende primært af organisk stof; oftest 90-98 % men undtagelsesvist af kun 80-85% på grund af usædvanligt store plastrængder. Mængden af fremmedlegemer ud over plast er forsvindende (skønsmæssigt < 1%).

Forbehandlingens betydning for biomassens andel af de forskellige komponenter i den kildesorterede organiske dagrenovation afhænger i et vist omfang både af affaldets oprindelse og af forbehandlingsteknologi. Eneste generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseeparatoren er, at rullesigten masse-mæssigt fordeler mere P og træstof over i biomassen end skrueseeparatoren gør. Masse-mæssigt betragtet er der dog ingen signifikante generelle forskelle mellem rullesigten og skrueseeparatoren med hensyn til at fordele det nedbrydelige organiske stof målt som EFOS til biomassen. Dog er der for de enkelte geografiske områder en række særlige forhold. For affald fra Kolding og Aalborg er der kun – træstof og P undtaget - små forskelle mellem rullesigtens og skrueseeparatorens fordeling af den kildesorterede dagrenovations indhold til biomassen. I runde tal havner 50-55% af alle komponenter i biomassen. For affald fra Hovedstadsområdet og fra Vejle forholder dette sig noget anderledes, idet rullesigten for en række komponenter masse-mæssigt her fordeler mere til biomassen på rullesigten end på skrueseeparatoren: det drejer sig i begge tilfælde om protein, EFOS, K, P, N, C, H og brændværdi. En god forklaring herpå haves ikke.

### 5.3 Sammensætning af biomasse og rejekt

Sammensætningen af biomassen for et givet system (geografi, indsamlingssystem, forbehandling) varierer over tid og variationen er forskellig for forskellige parametre. Den største variation ses for stivelse og sukker, som er let omsættelige komponenter og derfor formentlig også påvirkes af affaldets alder og opbevaringstemperatur. Også P og Cl, der begge forekommer i relative lave indhold, udviser store variationer. Den relative standardafvigelse er af størrelsen 30-40%. For de øvrige parametre er den tidsmæssige variation væsentlig mindre og for centrale parametre som tørstof, glødetab og EFOS kun 3-10%. Kvaliteten af de benyttede prøvetagningsprocedurer og analyseprocedurer, som er evaluerede hver for sig, synes at stå i fornuftigt forhold til den tidsmæssige variation af biomassens sammensætning.

Biomassens sammensætning varierer mellem de geografiske områder, idet den konstaterede forskel i askeindhold i den kildesorterede organiske dagrenovation for de forskellige geografiske områder også genfindes i biomassen: Askeindholdet er størst i biomasse fra Kolding og Vejle (15,0-16,7%) og mindst i Hovedstads-området (6,5-11,2%) og Grindsted (10,0%) og ikke signifikant påvirket af forbehandling. Bortset fra denne forskel i

askeindholdet er der, hvad angår det geografiske udgangspunkt ikke konstateret signifikante forskelle i sammensætningen af biomassen. Biomassen består typisk af 22-32% tørstof, heraf 83-93% organisk stof (VS), 10-14% fedt, 13-15% protein, 10-16% stivelse, 4-10% sukker og 16-24% træstof. De målte komponenter udgør i snit 80% af det organiske stof, idet resten beskrives som "andre kulhydrater".

De væsentligste forskelle i biomassens sammensætning skyldes forbehandlingen. Forskellen mellem neddeling + magnetseparering og rullesigtning er med hensyn til den resulterende biomasses sammensætning marginal. Den væsentligste forskel findes mellem biomasse fra rullesigte og fra skrueseparator. Generelt kan det siges, at biomasse fra skrueseparator, sammenlignet med biomasse fra rullesigte, indeholder mere vand (relativt 7-20% mindre TS), mere fedt (relativt 10-20% mere), mindre træstof (relativt 22-40% mindre) og mere EFOS (EFOS er 97,3-99,3 % af VS for skrueseparatoren sammenlignet med 87-94% af VS for rullesigten) samt mindre P (relativt 50% lavere).

Det organiske stof i rejektet er overordnet set ikke væsentligt forskelligt fra det organiske stof i biomassen. Mindre forskelle ses dog med hensyn til fedt og EFOS, hvor koncentrationerne i rejektet er lavere end i biomassen, og med hensyn til træstof, hvor koncentrationerne i rejektet er højere end i biomassen, især for rejekt fra skrueseparatoren

#### 5.4 Metanpotentialiet

Målinger af metanpotentialiet i laboratoriet over 50 døgn viser, at det organiske stof i biomassen fra forbehandlet kildesorteret organisk dagrenovation har et metan-potentiale på 465 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Målingerne udviser nogen variation, men der er ingen systematiske forskelle mellem geografiske områder, fælles og individuelle skraldespande og ej heller forbehandling. Metanpotentialer beregnet enten ud fra komponentsammensætningen eller ud fra grundstofsammensætningen viser som forventet noget højere værdier end de faktisk målte, men der er ingen korrelation mellem beregnede og målte værdier. Betragtes organisk stof med meget varierende sammensætning, for eksempel rent fedt og rent sukker, er der en klar korrelation mellem beregnede og målte værdier. For biomasse fra forbehandlet organisk dagrenovation er variationen imidlertid så lille at den overskygges af variationen i den biologiske måling af metanpotentialiet. Det kan ikke ud fra de gennemførte forsøg afgøres om måling eller beregning giver de mest brugbare estimater på metanpotentialiet.

Rejektets organiske del (uden plast) udviser også et væsentligt metanpotentiale, på VS-basis dog 25-40% mindre end potentialiet i biomassen. Dette indikerer at fordeling af en større mængde af det organiske stof til biomasse frem for til rejektet også vil øge metanpotentialiet i biomassen målt i forhold til den kildesorterede organiske dagrenovation, om end der ikke vil være fuld linearitet.

#### 5.5 Realiserbart metanpotentiale: metanudbytte

Bioforgasningen i pilot-biogasanlægget omsatte mellem 74 og 89 % af VS-indholdet i biomassen med et gennemsnit omkring 80%. Den afgassede

biomasse har et potentiale for yderligere at danne 40-50 Nml CH<sub>4</sub>/g VS oprindeligt tilført pilot-biogasanlægget svarende til yderligere 10-15% metan.

Metanudbyttet for biomasse fra kildesorteret organisk dagrenovation blev bestemt for 14 prøver ved bioforgasning i pilot-biogasanlæg. Potentialerne varierede i det væsentlige mellem 300-400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS, med et gennemsnit på 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS. Variationen kunne ikke henføres til forskelle i geografisk område, fælles og individuelle skraldespande og ej heller til forbehandlingsteknologien. De målte metanudbytter korrelerede ikke med målte biogaspotentialer og heller ikke på brugbar måde med beregnede biogaspotentialer. Metanudbyttet kan derfor bedst og nemmest relateres til VS i biomassen, når det drejer sig om forbehandlet organisk dagrenovation. Biogasudbyttet er i intervallet 300- 400 Nml CH<sub>4</sub>/g VS delvist korreleret med EFOS (enzym-fordøjeligt organisk stof) i biomassen; jo højere den enzymfordøjelige del er, des større metanudbytte synes sandsynlig. Korrelationen bygger dog kun på få målinger og må kun opfattes som en indikation.

Metan udgjorde 59-66% (gennemsnit 62%) af den dannede biogas, hvilket indikerer at et metanudbytte på 340 Nml CH<sub>4</sub>/g VS svarer til en biogasmængde på 515-575 Nml/g VS.

Metanudbyttet svarer til ca. 75-80% omsætning og reflekterer et termofilt biogasanlæg med en opholdstid på ca. 15 døgn. Metanudbyttet er bestemt efter stabil drift er etableret og det er næppe sandsynligt, at et væsentligt højere metanudbytte kan opnås i fuldskala-anlæg.

## 5.6 Energi, drivhusgasser og næringsstoffer

Modelberegninger af besparelser i energi, drivhusgasemission og næringsstoffer er gennemført for kildesorteret organisk dagrenovation for forskellige scenarier med hensyn til kildesorteringskriterier, indsamlingssystem, forbehandling og bioforgasning samt forbrænding af rejektet. Tilsvarende besparelser er også beregnet for direkte forbrænding af den organiske dagrenovation. I beregningerne indgår transport, procesenergi, energiproduktion samt substitution af kunstgødning.

Energibesparelsen ved bioforgasning af den organiske dagrenovation er den samme om forbehandlingen sker på rullsigte eller skrueseperator og er i øvrigt ikke væsentligt forskellig fra forbrænding af den organiske dagrenovation for Grindsted, Hovedstadsområdet, Kolding og Vejle, mens der er en lille fordel (ca. 9%) i Aalborg.

For drivhusgasserne er besparelsen ens ved bioforgasning og forbrænding for alle de undersøgte scenarier. Dog opnås der ca. 12 % mindre besparelse i drivhusgasemission ved bioforgasning frem for forbrænding i Grindsted. Dette skyldes udslip af metan.

Bioforgasningen af biomassen og forbrændingen af rejektet bidrager stort set med lige stor produktion af energi. Forskellene, der observeres i nogle af tilfældene, afhænger af fordelingen af tørstof og vand ved forbehandlingen. Den største samlede energiproduktion fås, når mest tørstof går i rejektet og mest vand i biomassen. Energibesparelsen ved at substituere kunstgødning har samme størrelse som energiforbruget til indsamling og transport af affaldet. Hver for sig - dog med modsat fortegn - udgør de dog kun ca. 10% af den

samlede energiproduktion ved bioforgasning af biomassen og forbrænding af rejektet. Dette indikerer, at optimering af energibesparelsen ved bioforgasning bør fokusere på optimering af gasproduktionen, gasudnyttelsen og forbrændingen af rejektet.

Den samlede energibesparelse er meget robust over for ændringer i det teknologiske system, idet ændringerne i energibesparelsen er lille ved en rejehtmængde på 7 % frem for på normalt på 30–44 % (+7%), ved en halvering af energiforbruget til indsamling af kildesorteret affald (+5%), ved en øget køreafstand fra 25 km til 150 km til forbehandlingsstedet (-9%) og ved en 13 % forøgelse af biogasproduktion pr. tons (+9%). Dog vil en ændring i det teknologiske system hvad angår energiudnyttelsen have væsentlige konsekvenser, idet et biogasanlæg med en gasmotor, hvor varmen køles væk vil give en reduktion i energibesparelsen på 23 % (-23%).

For drivhusgasserne er besparelsen ens for alle tilfælde.

Besparelsen i N, P og K forekommer ikke ved forbrænding og er pr. ton våd kildesorteret organisk dagrenovation ca. 5-7 kg N, 0,5-1 kg P og 1,5-2 kg K for bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle og Aalborg. I Grindsted, hvor affaldet er meget rent og kun forbehandles ved neddeling og magnetseparering er besparelse knap 100 % større, da rejehtmængden her er forsvindende.





## 6 Referencer

- /1/ Datarapport om sammensætning og biogaspotentiale af kildesorteret organisk dagrenovation. Rapport til Miljøstyrelsen samlet af Thomas H. Christensen, Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Orla Jørgensen, PlanEnergi, Skørping og Jes la Cour Jansen, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2002.
- /2/ Sammenhæng mellem sortering, forbehandling og kvalitet af biomasse. Rapport til Miljøstyrelsen udarbejdet af Orla Jørgensen, Planenergi, Skørping og Jes la Cour Jansen, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2002.
- /3/ Steen Sørensen, Grindsted Kommune, personlig oplysning via Bjarne Bro, Grindsted Kommune, 2002.
- /4/ Metanemission fra lagring af bioforgasset organisk dagrenovation. Rapport til Miljøstyrelsen udarbejdet af Søren Gabriel, Trine Lund Hansen, Thomas H. Christensen (Miljø & Ressourcer DTU), Sven G. Sommer og Karsten Sørensen (Forskningscentrum Bygholm), 2002.



# Bilag 1

## Status for indsamlede mængder kildesorteret organisk dagrenovation medio 2001

Jens Kjems Toudal , Rambøll



# Indhold

<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>	<b>7</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>9</b>
<b>2 BESKRIVELSE AF SYSTEMLØSNINGER</b>	<b>11</b>
2.1 AFAV I/S, FREDERIKSSUND	11
2.2 GRINDSTED KOMMUNE	11
2.3 HERNING KOMMUNE	12
2.4 NOVEREN I/S, AUDEBO	12
2.5 VEJLE KOMMUNE	13
2.6 AALBORG KOMMUNE	13
2.7 ÅRHUS KOMMUNE	13
<b>3 OPLYSTE MÆNGDER INDSAMLET ORGANISK DAGRENOVATION</b>	<b>15</b>
<b>4 SORTERINGSKRITERIER, INDSAMLINGSMETODE OG AFFALDSSMÆNGDER</b>	<b>17</b>
<b>5 REFERENCER</b>	<b>19</b>

Bilag 1: Spørgeskema

Bilag 2: Årsmængder kildesorteret organisk dagrenovation og indbyggertal



# Forord

Denne rapport er udarbejdet i et samarbejde mellem Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Rambøll (Virum) og Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Lunds Tekniska Högskola med støtte fra Miljøstyrelsens program for renere teknologi m.v. og en række affaldsaktører i Hovedstadsområdet (Københavns Kommune, R-98 og Vestforbrænding I/S).

Der rettes en varm tak til de kommuner og affaldsselskaber, der har deltaget i spørgeskemaundersøgelsen.

Rapporten er forfattet af Jens Kjems Toudal (Rambøll), med bistand fra Jes la Cour Jansen (Lunds Tekniska Högskola).

Konklusioner og vurderinger i nærværende rapport er forfatterens ansvar og udtrykker ikke nødvendigvis de finansierende parters synspunkter.

Juni, 2001

Thomas H. Christensen  
Jes la Cour Jansen





# Sammenfatning og konklusioner

Som led i bedømmelsen af biogaspotentialer af kildesorteret organisk dagrenovation er der foretaget en sammenfatning af danske erfaringer om mængder af kildesorteret, organisk dagrenovation til bioforgasning.

Det måtte indledningsvist erkendes, at datamaterialet vedrørende bioforgasning er meget lille. Undersøgelsen blev derfor udvidet til også at omfatte anlæg, som har indsamlet affald til kompostering. I alt blev 5 kommuner, som har foretaget en sådan indsamling, samt to affaldsselskaber med i alt 15 kommuner medtaget i undersøgelsen. Dette svarer til et befolkningsunderlag i indsamlingsområderne på ca. 335.000 personer (2000).

Der er en stor variationsbredde i de indsamlede mængder, fra ca. 35 til ca. 110 kg per person og år i de forskellige kommuner. Selv i kommuner, som hører under samme selskab og derfor har ens sorteringsforskrifter, var der en forskel på en faktor 2 mellem indsamlede mængder.

Der kunne ikke konstateres nogen entydig sammenhæng mellem sorteringsforskrifter og mængder. Det kunne heller ikke entydigt fastslås, at der indsamles større mængder til kompostering end til bioforgasning.

Ud fra de foreliggende data vurderes det, at det er muligt at indsamle omkring 90 kg organisk affald per person og år til bioforgasning i mindre kommuner, hvor der gøres en stor indsats for information og opfølgning. I større områder tyder datamaterialet på, at der til bioforgasning kan indsamles omkring 60 kg organisk affald per person og år.



# 1 Indledning

Som led i undersøgelsen af biogaspotentiallet i kildesorteret organisk dagrenovation er der foretaget en kortlægning og sammenfatning af danske erfaringer om mængde og kvalitet ved kildesortering af organisk dagrenovation til bioforgasning. Det måtte indledningsvist konstateres, at der kun findes ganske få eksempler på indsamling udelukkende til dette formål – nemlig i Grindsted (forgasning i renseanlæggets rådetank), i Herning (forgasning på biogasfællesanlægget Studsgård) og i Aalborg (begrænset frivillig ordning til separat forgasning på forsøgsanlæg, nu i Vaarst-Fjellerad).

Det har ikke været muligt at indhente oplysninger fra de almindelige kilder til oplysning om affaldsmængder og -sammensætning. Hverken ISAG-systemet eller Videncenter for Affald har opdaterede oplysninger herom, og DAKOFAs arbejdsgruppe om organisk affald befinder sig kun i opstartfasen på dette område. Heller ikke hverken Kompoststatistikken fra 1998 /1/ eller fra 1999 /2/ indeholder detaljerede oplysninger herom.

Efter aftale med Miljøstyrelsen er omfanget af denne delundersøgelse derfor udvidet til også at omfatte kommuner/anlæg, som indsamler/har indsamlet organisk dagrenovation med henblik på kompostering, og undersøgelsen er udformet som en spørgeskemaundersøgelse til udvalgte anlæg. Udvalget af anlæg er sket med baggrund i den seneste udgave af Kompoststatistikken /1/ og under hensyn til projektgruppens kendskab til aktuelle initiativer.

Henvendelse er sket til og svar modtaget fra følgende kommuner/anlæg:

- AFAV I/S, Frederikssund, for interessentkommunerne (oprindeligt kompost, nu biogas)
- Grindsted kommune (biogas)
- Herning kommune (biogas)
- NOVEREN I/S, Audebo, for interessentkommunerne (kompost)
- Vejle kommune (kompost)
- Aalborg kommune (biogas)
- Århus kommune (kompost, fra medio 2001 biogas)

Et eksemplar af det udsendte spørgeskema er vedlagt som bilag 1. Svarene er indarbejdet i denne rapport.

Kommunerne/selskaberne er bedt om og har i store træk givet oplysninger for de af årene 1995-2000, hvor indsamlinger har fundet sted.

Spørgeskemaerne indeholdt bl.a. spørgsmål om kvaliteten af bioaffaldet. De fleste af de adspurgte har medsendt oplysninger i form af udvalgte analyseresultater. Det er imidlertid vurderet, at disse oplysninger ikke er repræsentative, og resultaterne er derfor ikke medtaget i rapporten. I stedet henvises for så vidt angår dette spørgsmål til Miljøprojekt Nr. 702 2002, DEHP i husholdningsaffald /3/.



## 2 Beskrivelse af systemløsninger

### 2.1 AFAV I/S, Frederikssund

Kildesorteret organisk husholdningsaffald indsamles i husstandene i kommunerne (Frederikssund, Helsingør, Hundested, Jægerspris, Slangerup, Stenløse, Ølstykke) i udleverede grønne plastposer og fra husstandene i papirsække eller spande/-containere. Indsamling af affald til kompostering er sket siden 1978 og af kildesorteret affald siden 1989.

Den gældende sorteringvejledning tillader visse former for ikke-forgasbart affald, herunder bleer og potteplanter.

Affaldet blandes med 8-10% halm som strukturmiddel (tidligere er brugt papir). Affaldet forbehandles (poser rives op og affaldet findeles) i et tromleanlæg (oprindeligt en DANO hurtigkomposteringstrømle) med flere efterfølgende sigtninger, hvorved 25-30% af affaldsmængden fjernes. Den frasorterede mængde forbrændes.

Den således forbehandlede masse blev oprindeligt udlagt i miler til kompostering, men har fra april 2001 været delvist og fra september 2001 fuldt ud afsat til bioforgasning sammen med gylle og industriaffald på fire anlæg i Danmark: Fangel, Hashøj, Nysted og Studsgård. Fordelingen mellem anlæggene er nogenlunde ligelig, men varierer afhængigt af anlæggenes driftsforhold.

Det forbehandlede affald, som afsættes til bioforgasning, disponeres i henhold til praksis på de pågældende anlæg. De nævnte anlæg er biogasfællesanlæg med hovedvægten på gylle.

### 2.2 Grindsted kommune

Kildesorteret organisk husholdningsaffald indsamles i husstandene i hele kommunen i udleverede papirposer og fra husstandene i papirsække. Indsamling er sket fra 1997.

Den gældende sorteringvejledning tillader ingen former for ikke-forgasbart affald, herunder hverken bleer og hygiejnebind, potteplanter eller dyreekskrementer.

Der finder ingen forbehandling sted af affaldet bortset fra en indledende oprivning af sække og udtagning af magnetisk materiale i en magnetseparator.

Affaldet blandes med slam og industriaffald i det kommunale spildevandsrensningens rådningsanlæg og forgasses her.

Efter forgasningen separeres biomassen i en fast og en flydende fraktion.

Den faste fraktion efterbehandles ved sigtning/sortering. Det skønnes, at ca. 0,5% af den indsamlede mængde frasorteres og forbrændes.

Den flydende fraktion (vandholdet i det indsamlede affald) udledes sammen med spildevandet. Den faste fraktion udspreddes sammen med slammet på landbrugsjord.

### 2.3 Herning kommune

Kildesorteret organisk husholdningsaffald indsamles i husstandene i hele kommunen i plastposer efter husstandens eget valg og fra husstandene i spande/containere. Indsamling er sket fra 1993 og bioforgasning på det nuværende anlæg (Studsgård) siden 1996.

Den gældende sorteringsvejledning tillader ingen former for ikke-forgasbart affald, herunder hverken bleer, hygiejnebind, papir/pap eller dyrestrøelse og -ekskremerter.

Affaldet forbehandles på en rullsigte, hvorved ca. 20-25% af mængden fjernes. Den frasorterede mængde forbrændes.

Affaldet blandes med gylle og industriaffald inden forgasning på Studsgård biogasfællesanlæg.

Efter forgasningen separeres biomassen i en fast og en flydende fraktion.

Den faste fraktion af det blandede restprodukt forbrændes.

Den flydende fraktion af det blandede restprodukt udspreddes på landbrugsjord.

### 2.4 NOVEREN I/S, Audebo

Kildesorteret organisk husholdningsaffald indsamles i tilmeldte husstande i kommunerne (Bjergsted, Holbæk, Kalundborg, Nykøbing-Rørvig, Svinninge, Tornved, Trundholm, Tølløse). Interessentkommunen Dragsholm foreskriver hjemmekompostering af vegetabilsk affald og deltager ikke i det fælles anlæg. Sorteringen sker i plastposer efter husstandens eget valg. Affaldet indsamles fra husstandene i papirsække (7 kommuner) eller dobbeltkammerspande (1 kommune). Indsamling af kildesorteret affald til kompostering er gradvist indført i kommunerne i årene 1995-97.

Den gældende sorteringvejledning tillader visse former for ikke-forgasbart (men komposterbart) affald, herunder kattegrus, plantemuld og potteplanter. Tølløse kommune accepterer tillige bleer og hygiejnebind.

Affaldet forbehandles i en neddeler, en magnetseparator og en rullsigte, hvorved ca. 35% af mængden fjernes. Den frasorterede mængde forbrændes.

Det forbehandlede affald behandles ved bokskompostering under tilsætning af luft og vand i lukket bygning. Affaldet/komposten vendes i boksene og ved flytning fra boks til boks. Opholdstiden er 1½-2 måneder. Herefter eftermodnes komposten udendørs i ca. 2-3 måneder.

Det var hensigten efter en afsluttende sigtning at afsætte komposten. Forbehandlingen skaber imidlertid mange meget små plaststykker i komposten, som eftersigtningen ikke kan fjerne. Komposten kan derfor ikke sælges. Komposten er indtil nu (maj 2001) blevet mellemdeponeret på anlægget. Hvis en acceptabel finsigtning kan etableres, agter NOVEREN at anvende komposten til afdækning på selskabets deponeringsanlæg.

## 2.5 Vejle kommune

Kildesorteret organisk husholdningsaffald indsamles i husstandene i kommunen i udleverede grønne plastposer og restaffaldet i udleverede sorte plastposer. Kommunen har desuden udleveret dobbeltstativer til placering i køkkenet. Fra husstandene indsamles affaldet blandet i spande/containerer. Indsamling af kildesorteret affald til kompostering er sket siden 1989.

Efter indsamlingen sorteres affaldet i et optisk sorteringsanlæg (efter posernes farve) i grønt affald og restaffald.

Den gældende sorteringvejledning tillader visse former for ikke-forgasbart (men generelt komposterbart) affald, herunder bleer, hygiejnebind og potteplanter.

Affaldet forbehandles i en biotromle med sigte, hvorved ca. 25% af mængden fjernes. Den frasorterede mængde forbrændes.

Det forbehandlede affald milekomposteres på anlægget.

Den færdige kompost sigtes inden afsætning. Herved fjernes yderligere ca. 10% af den totale affaldsmængde. Denne rest forbrændes. Den færdige kompost sælges til blanding med andre produkter, og dette produkt afsættes som kompost/jordforbedringsmiddel.

## 2.6 Aalborg kommune

Kildesorteret organisk husholdningsaffald indsamles i husstandene i udleverede plastposer og fra husstandene i 80 liter spande (indtil 1999 i papirsække). Indsamling er sket fra 1990. Indsamlingsordningen er etableret på frivillig basis, og kun et lille antal husstande (ca. 2300) deltager. Indsamlingen er siden starten sket med henblik på bioforgasning på forskellige forsøgsanlæg. I 1998 etablerede kommunen sit eget separate bioforgasningsanlæg for husholdningsaffald i tilknytning til Vaarst-Fjellerad biogasanlæg, som forgasser gylle og industriaffald.

Den gældende sorteringvejledning tillader ingen former for ikke-forgasbart affald, herunder hverken bleer, hygiejnebind eller kattegrus.

Affaldet forbehandles i en Dewaster. I processen separeres affaldet i en tyktflydende, organisk del og en fast del, i stor udstrækning plastposer og ikke-forskriftsmæssigt affald (mælkekartoner, plast, dåser). Herved fjernes ca. 40% af den indsamlede mængde. Den frasorterede mængde forbrændes.

Den ”våde” fraktion bioforgasses i et separat anlæg. Efter forgasningen separeres biomassen i en flydende og en fast fraktion. Den flydende fraktion udbringes på landbrugsjord sammen med den afgasse gylle/industriaffald fra det parallelle biogasanlæg, medens den faste fraktion brændes.

## 2.7 Århus kommune

Århus kommune har i sommeren 2001 skiftet fra kompostering af kildesorteret organisk husholdningsaffald til bioforgasning af dette affald. Eftersom der endnu ikke er specifikke erfaringer med bioforgasningen, er det i det følgende og i mængdeopgørelserne komposteringsanlæggets indretning og drift, som er beskrevet. En kort beskrivelse af det nye biogassystem er dog medtaget.

Kildesorteret organisk husholdningsaffald blev indsamlet i husstandene i et forsøgsområde i plastposer efter husstandens eget valg og fra husstandene i 130 liter spande (parcelhuse) og 660 liter containere (andre). Indsamling er sket fra 1995.

I det nye biogassystem bliver affaldet indsamlet og håndteret i et to-pose-system med udleverede plastposer svarende til det af Vejle kommune anvendte.

Sorteringsvejledningen tillod visse former for ikke-forgasbart (men generelt komposterbart) affald, herunder kattegrus og plantemuld/potteplanter med jord. Desuden var mindre mængder haveaffald tilladt. I den nye indsamling til bioforgasning er disse affaldskategorier udgået af biofraktionen.

Affaldet blev ikke forbehandlet inden den foretagne reaktorkompostering.

Efter komposteringen blev komposten sigtet inden afsætning. Den frasorterede mængde udgjorde 10-15% af den indsamlede kildesorterede affaldsmængde.

Komposten blev afsat direkte til forbrugerne.



### 3 Oplyste mængder indsamlet organisk dagrenovation

De oplyste, indsamlede kildesorterede dagrenovationsmængder fremgår af tabellen, bilag 2. Ud fra disse og det oplyste antal indbyggere i indsamlingsområdet er specifikke årlige mængder (kg indsamlet, kildesorteret dagrenovation pr. indbygger og år) i hver kommune beregnet. I tabellen er der for hvert af de to selskabers områder (AFAV I/S og NOVEREN I/S) foretaget en summation af de indsamlede mængder. Desuden er foretaget en summation og beregning af specifikke årlige mængder for alle de i undersøgelsen medtagne områder.

Til de enkelte kommuner/områder i tabellen skal knyttes følgende kommentarer:

- Grindsted: I 1997 er kun indsamlet i 9 måneder. Den opgivne mængde er ekstrapoleret til en årsmængde. Antal indbyggere er 6.200 husstande med en angivet gennemsnitstørrelse på 2,25 indbyggere pr. husstand.
- NOVEREN: Antal indbyggere er beregnet af NOVEREN ud fra antal tilsluttede husstande.
- Vejle: Der foretages ikke løbende registrering af mængden af kildesorteret organisk dagrenovation. Det er oplyst, at der årligt indsamles ca. 10.000 tons blandet dagrenovation, og at det ved en undersøgelse for ca. 4 år siden blev konstateret, at 45% heraf er organisk. Årsmængden er oplyst at være konstant.
- Aalborg: Antal indbyggere i indsamlingsområdet er ret usikkert. Der indsamles (år 2000) fra ca. 650 enfamiliehuse og 1650 husstande i etageboliger, men for de sidste er det usikkert, om det er antal opgange, hvor flere husstande fra hver opgang kan benytte ordningen, eller det er det samlede antal tilsluttede husstande i alle opgange. Aalborg kommune har oplyst, at den gennemsnitlige husstandsstørrelse i kommunen er 2,7 personer pr. husstand. Den specifikke årsmængde er derfor at betragte som en øvre værdi. I 1996 var der ingen afsætning for affaldet, hvorfor der ikke er registreret nogen væsentlig mængde i dette år.
- Århus: I årene 1995, 1996, 1998 og 2000 er der kun indsamlet en del af året (mellem 6 og 10 måneder). For disse år er den opgivne mængde ekstrapoleret til en årsmængde.



## 4 Sorteringskriterier, indsamlingsmetode og affaldsmængder

Sorteringskriterierne må forventes at have betydning for affaldsmængderne, idet man må forvente, at et større antal tilladte fraktioner (bleer, potteplanter og –jord, haveaffald) vil resultere i en større mængde.

Af de kommuner/selskaber, som indgår i undersøgelsen, har AFAV, NOVEREN, Vejle og Århus tilladt flest affaldsfraktioner, hvilket hænger naturligt sammen med, at disses anlæg er eller i hvert fald er etableret som (AFAV) komposteringsanlæg. Århus skiller sig ud fra de øvrige nævnte ved også at have tilladt mindre mængder haveaffald. De kommuner, som fra start har indsamlet affald med henblik på bioforgasning (Grindsted, Herning, Aalborg), har også været mest restriktive med hensyn til disse affaldsfraktioner, som kan give problemer i biogasanlægget og/eller som kun giver en ret ringe eller ingen biogasmængde.

Tilsvarende må indsamlingsteknologien forventes at have betydning for affaldsmængden, idet der er forskel på emballagens vægt. Man således må forventes størst mængder, hvor der indsamles med papirposer og papirsække (Grindsted) og mindst, hvor der indsamles med plastposer og spande/containere (AFAV (delvist), Herning, Vejle, Aalborg, Århus). Papirsække vejer mellem 142 (50 l) og 217 (110 l) gram pr. styk og papirposer (8 liter, som anvendes i Grindsted) 19 gram pr. styk /4/. Alt andet lige må dette forventes at give en årlig affaldsmængde pr. husstand, som er ca. 10 kg større i Grindsted end i kommuner med plastposer og spande, svarende til ca. 4 kg pr. indbygger pr. år.

Vurdering af de oplyste mængder, som de fremgår af tabellen i bilag 2, viser imidlertid, at disse antagelser ikke bekræftes af de aktuelle tal:

”Kompostkommunerne” i AFAV og Vejle kommune har ganske vist indsamlet de største mængder, men disse er ikke større end de mængder, som er indsamlet i Grindsted, selv med fradrag for den ekstra vægt, som emballagen må antages at give i denne kommune. Desuden er mængderne i de øvrige ”kompostkommuner” NOVEREN og Århus markant mindre end i AFAV og Vejle og i samme størrelsesorden som i ”biogaskommunerne” Herning og Aalborg.

Tilsvarende er forskellen i mængder mellem de forskellige kommuner såvel i de enkelte selskaber som mellem selskaberne langt større end den ovenfor nævnte mulige vægtforskel mellem plastposer/containere og papirposer/papirsække kan begrunde.

Det er endvidere bemærkelsesværdigt, at der selv inden for områder (AFAV og NOVEREN), hvor indsamlingskriterierne er ens for alle kommuner, er en markant forskel på de aktuelt indsamlede mængder. Både inden for AFAVs og NOVERENs område er denne forskel på omkring en faktor 2 i specifikke mængder mellem den ”bedste” og den ”dårligste” kommune.

Én konklusion - som også synes logisk - kan dog muligvis drages af oplysningerne i tabellen i bilag 2: At mængderne pr. indbygger og år er størst i de kommuner, hvor ordningen er obligatorisk og har været i drift i mange år (AFAV og Vejle)

og/eller i kommuner, hvor ordningen er obligatorisk og der er gjort en stor praktisk og administrativ indsats for at få befolkningen til at anvende ordningen korrekt (Grindsted) /5/.

Det må imidlertid bemærkes, at mængderne i Grindsted reelt er væsentligt højere end i AFAV og Vejle, idet det i Grindsted ikke er nødvendigt at frasortere affald ved en forbehandling, medens de to sidstnævnte områder/kommuner frasorteres 25-35% af affaldet ved forbehandling og (Vejle) eftersigtning. Mængden i Grindsted (på ca. 90 kg/indbygger/år, når der foretages fradrag for papiremballage), kan derfor muligvis anses for at være den maksimale mængde organisk, kildesorteret dagrenovation, som det er muligt at indsamle, hvis der gøres en stor indsats inden for et geografisk afgrænset område.

Det er bemærkelsesværdigt, at den indsamlede, specifikke affaldsmængde (i kg/indbygger/år) inden for det område med et indbyggerantal på omkring 300.000 indbyggere, som opgørelsen i tabel 3.1 dækker, har været næsten konstant i de seneste fire år (mellem 69 og 71 kg/indbygger/år). Denne mængde kan derfor muligvis antages at være den reelt mulige i større områder, for eksempel på landsplan.

Det må antages, at der vil være betydelige mængdemæssige variationer, som skyldes befolknings sammensætning og bebyggelsesform, men det er faldet uden for denne begrænsede undersøgelses rammer at vurdere dette. Desuden må det antages, at den befolkningsmængde, som er omfattet af denne undersøgelse, er rimeligt repræsentativ.

Med henblik på bioforgasning bør den ovenfor nævnte mængde sandsynligvis reduceres lidt, idet en meget væsentlig del af den (fra omkring 257.000 af 335.000 indbyggere i 2000) er indsamlet med henblik på kompostering med de mindre restriktive sorteringskrav, som er/har været gældende herfor. Der er ikke data-mæssigt grundlag for at beregne denne reduktion, men under hensyn hertil samt til de relativt små mængder, som er indsamlet i de større bymæssige bebyggelser Aalborg og Århus, skønnes en mængde på landsplan på omkring 60 kg pr. indbygger og år organisk, kildesorteret (men ikke forbehandlet) dagrenovation at være en realistisk størrelse. Denne størrelsesorden svarer til, hvad der er fundet ved tidligere, tilsvarende undersøgelser.

## 5 Referencer

- /1/ Behandling af organisk affald fra husholdninger m.v. (Kompoststatistik 1998). Videncenter for Affald og Genanvendelse.
- /2/ Miljøprojekt nr. 624. Statistik for behandling af organisk affald fra husholdninger . Miljøstyrelsen 2001.
- /3/ DEHP i husholdningsaffald, Jesper Kjølholt, Jes la Cour Jansen og Claus Dahl Thomsen COWI Rådgivende Ingeniører A/S, Miljøprojekt Nr. 702 2002.
- /4/ Anette Tomra, Korsnäs-Bates. Personlig kommunikation.
- /5/ Tage Christensen, Grindsted kommune. Personlig kommunikation.



**Miljøstyrelsens projekt:  
 Bioforgasning af organisk dagrenovation: Basisdokumentation for  
 biogaspotentiale i organisk husholdningsaffald  
 Oplysninger om erfaring med kildesortering af organisk dagrenovation**

<b>1. Anlæg/kommune (navn, adresse, tlf. nr., fax nr., E-post adresse):</b>	
<b>2. Kontaktperson</b>	
3. Anlæg etableret år	
<b>4. Indsamling af kildesorteret husholdningsaffald påbegyndt (år, måned)</b>	
<b>5. Indsamlingsform i husstanden</b>	
Indsamling i plastposer (ja/nej)	
Indsamling i papirposer (ja/nej)	
Valgfrit indsamlingsmateriel (ja/nej)	
Andet – beskriv materiel	
<b>6. Indsamlingsform ved husstanden</b>	
Indsamling i plasticsække (ja/nej)	
Indsamling i papirsække (ja/nej)	
Indsamling i containere / spande (ja/nej) Angiv størrelse i liter:	
Andet – beskriv materiel	
<b>7. Nuværende sorteringsvejledning udarbejdet og taget i brug (år, måned)</b>	
Sorteringsvejledningen bedes fremsendt i trykt form eller som elektronisk fil til RAMBØLL	
<b>8. Sorteringsvejledning sidst ændret i (år, måned)</b>	
- - Hvis ændret - hvilke ændringer blev foretaget og hvorfor?	
<b>9. Nuværende sorteringsvejledning planlagt ændret (ja/nej)</b>	
- Hvis ja – hvilke ændringer overvejes, og hvorfor?	
<b>10. Indsamlede mængder kildesorteret husholdningsaffald</b>	
Se og udfyld venligst vedlagte skema (EXCEL-fil)	
<b>11. Forbehandling/forsortering inden kompostering/bioforgasning (ja/nej)</b>	
- Hvis ja – behandlingen art (rullesigte, tromlesigte, mv.)	
- Hvis ja – hvor stor en procentdel sorteres fra?	
- Hvis ja – hvad sker der med den frasorterede mængde (forbrænding, deponering, andet (og da hvad))	

<b>12. Behandlingens art</b>	
Milekompostering (ja/nej)	
Anden kompostering (ja/nej) – beskriv metode	
Bioforgasning kun af husholdningsaffald (ja/nej)	
Bioforgasning med gylle (ja/nej)	
Bioforgasning med gylle og industriaffald (ja/nej)	
Bioforgasning med industriaffald (ja/nej)	
<b>13. Efterbehandling af kompost/restprodukt (ja/nej)</b>	
Separering i fast/flydende (ja/nej)	
Kompostering af fast biogasrestprodukt (ja/nej)	
Sigtning/sortering af kompost/biogasrestprodukt (ja/nej)	
- Hvis ja – hvor stor en procentdel sorteres fra (angives i % af indsamlet mængde, jf. pkt. 10)	
Andet (ja/nej) - beskriv metode	
<b>14. Anvendelse af flydende restprodukt</b>	
På landbrugsjord med gylle/øvrige restprodukt (ja/nej)	
Andet (ja/net) – beskriv metode	
<b>15. Anvendelse af fast restprodukt</b>	
Sælges/afsættes direkte som kompost (ja/nej)	
Sælges/afsættes til blanding med andre produkter til kompost/jordforbedringsmiddel (ja/nej)	
Forbrændes (ja/nej)	
Andet (ja/nej) – beskriv metode	
<b>16. Øvrige oplysninger om indsamlet, kildesorteret husholdningsaffald</b> Kan være kemiske analyser, TS, VOC, TOC, generel vurdering af kvalitet, mv. Oplysninger herom kan gives som vedlagte / fremsendte kopier af rapporter, analyseblanketter mv.	
<b>17. Øvrige oplysninger om indsamlet, kildesorteret, forbehandlet husholdningsaffald</b> Kan være kemiske analyser, TS, VOC, TOC, generel vurdering af kvalitet, mv. Oplysninger herom kan gives som vedlagte / fremsendte kopier af rapporter, analyseblanketter mv.	
<b>18. Øvrige oplysninger om restprodukt/kompost fra husholdningsaffald</b> Kan være kemiske analyser, TS, VOC, TOC, generel vurdering af kvalitet, mv. Oplysninger herom kan gives som vedlagte / fremsendte kopier af rapporter, analyseblanketter mv.	
<b>19. Andre oplysninger af som vurderes af betydning</b>	



Selskab / Kommune	1995			1996			1997			1998			1999			2000		
	Tons/år	Indbyggere	Kg/indbg./år	Tons/år	Indbyggere	Kg/indbg./år	Tons/år	Indbyggere	Kg/indbg./år	Tons/år	Indbyggere	Kg/indbg./år	Tons/år	Indbyggere	Kg/indbg./år	Tons/år	Indbyggere	Kg/indbg./år
<b>AFAV I/S</b>																		
Frederikssund	486	17206	28,2	1045	17226	60,6	1379	17349	79,5	1419	17361	81,7	1447	17594	82,2	1358	17865	76,0
Helsinge	1021	18044	56,6	1386	18122	76,5	1538	18305	84,0	1506	18323	82,2	1746	18569	94,0	1698	18687	90,9
Hundested	419	9216	45,5	605	9313	64,9	742	9318	79,6	770	9344	82,4	766	9412	81,4	755	9450	79,9
Jægerspris	587	8887	66,0	551	8967	61,4	554	9017	61,4	587	9208	63,7	602	9351	64,4	534	9274	57,6
Slangørup	659	7975	82,6	759	8091	93,9	784	8180	95,8	829	8167	101,5	916	8248	111,0	934	8409	111,1
Stenløse	825	12577	65,6	1066	12617	84,5	1209	12662	95,5	1155	12815	90,1	1099	12867	85,4	1217	12952	94,0
Ølstykke	740	13449	55,0	1231	13587	90,6	1277	13767	92,8	1309	14077	93,0	1380	14251	96,8	1453	14413	84,4
<b>Total / gennemsnit AFAV I/S</b>	<b>4737</b>	<b>87354</b>	<b>54,2</b>	<b>6643</b>	<b>87923</b>	<b>75,6</b>	<b>7483</b>	<b>88598</b>	<b>84,5</b>	<b>7575</b>	<b>89295</b>	<b>84,8</b>	<b>7955</b>	<b>90292</b>	<b>88,1</b>	<b>7950</b>	<b>91050</b>	<b>87,3</b>
<b>Grindsted</b>							900	13950	64,5	1180	13950	84,6	1232	13950	88,3	1302	13950	93,3
<b>Herning</b>																3030	58000	52,2
<b>NOVEREN I/S</b>																		
Bjergsted	0	2.550	0,0	115	2.550	45,1	120	2.550	47,1	101	2.550	39,6	120	2.550	47,1	135	2.550	52,9
Dragsholm	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
Holbæk	15	31.300	0,5	972	31.300	31,1	1.592	31.300	50,9	1.449	31.300	46,3	1.495	31.300	47,8	1.505	31.300	48,1
Kalundborg	71	9.900	7,2	225	9.900	22,7	226	9.900	22,8	431	9.900	43,5	456	9.900	46,1	458	9.900	46,3
Nykøbing-Rørvig	0	0	0,0	0	0	0,0	155	6.200	25,0	238	6.200	38,4	226	6.200	36,5	243	6.200	39,2
Svinninge	0	0	0,0	49	1.900	25,8	82	1.900	43,2	82	1.900	43,2	68	1.900	35,8	65	1.900	34,2
Tornved	0	0	0,0	403	5.650	71,3	459	5.650	81,2	462	5.650	81,8	415	5.650	73,5	420	5.650	74,3
Trundholm	0	0	0,0	88	2.250	39,1	121	2.250	53,8	88	2.250	39,1	119	2.250	52,9	138	2.250	61,3
Tølløse	384	9.200	41,7	420	9.200	45,7	430	9.200	46,7	390	9.200	42,4	449	9.200	48,8	542	9.200	58,9
<b>Total / gennemsnit NOVEREN I/S</b>	<b>470</b>	<b>52.950</b>	<b>8,9</b>	<b>2.272</b>	<b>62.750</b>	<b>36,2</b>	<b>3.185</b>	<b>68.950</b>	<b>46,2</b>	<b>3.241</b>	<b>68.950</b>	<b>47,0</b>	<b>3.348</b>	<b>68.950</b>	<b>48,6</b>	<b>3.506</b>	<b>68.950</b>	<b>50,8</b>
<b>Vejle</b>	4.500	54.000	83,3	4.500	54.000	83,3	4.500	54.000	83,3	4.500	54.000	83,3	4.500	54.000	83,3	4.500	54.000	83,3
<b>Aalborg</b>	345	7000	49,3	34	7000	4,9	243	7000	34,7	273	7000	39,0	265	7000	37,9	318	6200	51,3
<b>Århus</b>	2.688	55.000	48,9	1.985	43.000	46,2	2.767	43.000	64,3	2.364	43.000	55,0	2.390	43.000	55,6	2.750	43.000	64,0
<b>Total / gennemsnit alle kommuner</b>	<b>12.740</b>	<b>256.304</b>	<b>49,7</b>	<b>15.434</b>	<b>254.673</b>	<b>60,6</b>	<b>19.078</b>	<b>275.498</b>	<b>69,2</b>	<b>19.133</b>	<b>276.195</b>	<b>69,3</b>	<b>19.760</b>	<b>277.192</b>	<b>71,3</b>	<b>23.356</b>	<b>335.150</b>	<b>69,7</b>

# Bilag 2

## Sammenstilling af danske basisdata for bioforgasning af organisk dagrenovation

Trine Lund Hansen<sup>1</sup>, Hans W. Rasmussen<sup>2</sup>, Jes la Cour Jansen<sup>3</sup>, Janus T. Kirkeby<sup>1</sup> og Thomas Højlund Christensen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet

<sup>2</sup>Energi & Miljø, Rambøll

<sup>3</sup>Lunds Tekniska Högskola

November 2001



# Indhold

<b>INDHOLD</b>	<b>3</b>
<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMMENFATNING OG KONKLUSION</b>	<b>7</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>9</b>
1.1 BAGGRUND	9
1.2 FORMÅL	10
1.3 METODE	11
1.4 UDVÆLGELSE AF RAPPORTEREDE UNDERSØGELSER	11
1.5 SYSTEMBESKRIVELSE OG TERMINOLOGI	12
<b>2 SINDING-ØRRE (HERNING), FORSØGSANLÆG</b>	<b>15</b>
2.1 INDLEDNING	15
2.2 INDSAMLET AFFALD	15
2.3 BEHANDLINGSMETODE	15
2.4 PROCESDATA	16
2.5 RESTPRODUKTER	17
2.6 DRIFTSERFARINGER	18
2.7 KONKLUSION	18
<b>3 SINDING-ØRRE (HERNING), FULDSKALAANLÆG</b>	<b>21</b>
3.1 INDLEDNING	21
3.2 INDSAMLET AFFALD	21
3.3 BEHANDLINGSMETODE	21
3.4 PROCESDATA	22
3.5 DRIFTSERFARINGER	24
3.6 KONKLUSION	25
<b>4 STUDSGÅRD BIOGASANLÆG (HERNING)</b>	<b>27</b>
4.1 INDLEDNING	27
4.2 INDSAMLET AFFALD	27
4.3 BEHANDLINGSMETODE	28
4.4 PROCESDATA	29
4.5 DRIFTSERFARINGER	31
4.6 KONKLUSION	31
<b>5 GRINDSTED RENSEANLÆG</b>	<b>33</b>
5.1 INDLEDNING	33
5.2 INDSAMLET AFFALD	33
5.3 BEHANDLINGSMETODE	34
5.4 PROCESDATA	35
5.5 DRIFTSERFARINGER	36
5.6 KONKLUSION	37
<b>6 VEGGER BIOGASANLÆG</b>	<b>39</b>
6.1 INDLEDNING	39
6.2 INDSAMLET AFFALD	39

6.3	BEHANDLINGSMETODE	39
6.4	PROCESDATA	40
6.5	DRIFTSERFARINGER	42
6.6	KONKLUSION	42
<b>7</b>	<b>NORDSJÆLLANDS BIOGASANLÆG I/S</b>	<b>45</b>
7.1	INDLEDNING	45
7.2	INDSAMLET AFFALD	45
7.3	BEHANDLINGSMETODE	46
7.4	PROCESDATA	47
7.5	DRIFTSERFARINGER	49
7.6	KONKLUSION	49
<b>8</b>	<b>VAARST-FJELLERAD (MILJØPROJEKT 443)</b>	<b>51</b>
8.1	INDLEDNING	51
8.2	INDSAMLET AFFALD	51
8.3	BEHANDLINGSMETODE	52
8.4	PROCESDATA	52
8.5	DRIFTSERFARINGER	54
8.6	KONKLUSION	54
<b>9</b>	<b>VAARST-FJELLERAD (AALBORG, DEWASTERFORSØG), SOMMEREN 1999</b>	<b>57</b>
9.1	INDLEDNING	57
9.2	INDSAMLET AFFALD	57
9.3	BEHANDLINGSMETODE	57
9.4	PROCESDATA	58
9.5	DRIFTSERFARINGER	59
9.6	KONKLUSION	59
<b>10</b>	<b>VAARST-FJELLERAD (AALBORG, DEWASTERFORSØG), JANUAR 2000</b>	<b>61</b>
10.1	INDLEDNING	61
10.2	INDSAMLET AFFALD	61
10.3	BEHANDLINGSMETODE	62
10.4	PROCESDATA	62
10.5	DRIFTSERFARINGER	63
10.6	KONKLUSION	63
<b>11</b>	<b>DANSKE LABORATORIEFORSØG</b>	<b>65</b>
11.1	LARS ROHOLD, DTU 1995	65
11.2	H. HARTMANN, DTU 2001	66
<b>12</b>	<b>SAMMENFATNING</b>	<b>69</b>
<b>13</b>	<b>REFERENCER</b>	<b>71</b>

# Forord

Denne rapport er udarbejdet i et samarbejde mellem Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Rambøll (Virum) og Avdelningen för VA-Teknik, Lunds Tekniska Högskola med støtte fra Miljøstyrelsens program for renere teknologi m.v. og fra en række affaldsaktører i Hovedstadsområdet (Københavns Kommune, R-98 og Vestforbrænding I/S).

Rapporten er forfattet af Trine Lund Hansen (E&R DTU) og Hans W. Rasmussen (Rambøll) med assistance fra Jes la Cour Jansen (Lund), Janus T. Kirkeby (E&R DTU) og Thomas H. Christensen (E&R DTU) i perioden marts - juni 2001.

Der takkes for velvillig assistance fra en række af de citerede forfattere i forbindelse med afklaring af tekniske spørgsmål i foreliggende rapporter: Henrik Ørtenblad, Keld Johansen, Bjarne Bro og Henrik Møller.

Konklusioner og vurderinger i nærværende rapport er forfatterens ansvar og udtrykker ikke nødvendigvis de finansierende parters synspunkter.

Juni, 2001

Thomas H. Christensen  
Jes la Cour Jansen



# Sammenfatning og konklusion

En gennemgang af rapporterede danske data om bioforgasning af organisk dagrenovation viser, at der kun er rapporteret driftsdata fra tre anlæg i normal drift, medens øvrige rapporter vedrører korterevarende undersøgelser enten i forsøgsanlæg eller i eksisterende biogasfællesanlæg, der har været drevet med organisk dagrenovation i en kortere periode.

Der er ikke rapporteret undersøgelser med behandling af organisk dagrenovation i teknisk eller fuld skala, der er planlagt og gennemført således, at de fremkomne data giver en veldokumenteret sikker bestemmelse af det opnåede gasudbytte fra organisk dagrenovation.

Mange undersøgelser har været gennemført med henblik på teknikudvikling eller afprøvning af samlede løsninger til håndtering og bioforgasning af affaldet. I nogle tilfælde har måling af gasudbyttet ikke været inddraget. I andre tilfælde har forsøgene været præget af tekniske eller driftsmæssige problemer, således at de opnåede gasudbytter kun har kunnet bestemmes med væsentlig usikkerhed.

I undersøgelserne er der anvendt kildesorteret dagrenovation fra mange forskellige indsamlingsordninger med betydelige forskelle i indsamlingsvejledninger og kvalitet af det indsamlede materiale. Derudover er der anvendt flere forskellige typer forsortering af affaldet inden bioforgasningen. Det er ikke muligt at knytte de opnåede resultater entydigt sammen med kriterierne i affaldsindsamlingen og effekten af forsorteringsanlægget.

Dagrenovationen er typisk behandlet sammen med andet organisk materiale, især gylle; men også sambehandling med kommunalt spildevandsslam og organisk industriaffald er rapporteret.

Det beregnede biogasudbytte for dagrenovationen er i de fleste tilfælde fundet på basis af det samlede målte gasudbytte, fratrukket et teoretisk beregnet bidrag fra det øvrige organiske materiale. I de fleste tilfælde har dagrenovationen kun udgjort en mindre andel af affaldet og bidraget til gasudbyttet herfra er derfor bestemt med stor usikkerhed. I en række tilfælde er gasudbyttet ikke målt; men har kunnet beregnes teoretisk ud fra affaldets indhold af organisk stof målt som COD eller VS.

Gasudbytter for organisk dagrenovation må på ovennævnte baggrund anses for usikkert bestemt. På baggrund af undersøgelserne skønnes det for forbehandlet affald at ligge i området 110-180 Nm<sup>3</sup>/ton affald med et metanindhold på ca. 65% (70-115 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton forbehandlet affald), svarende til typisk 100-120 Nm<sup>3</sup>/ton indsamlet affald. Der findes dog indsamlingsordninger, hvor frasorteringen er meget lille (f.eks. i Grindsted), således at gasudbyttet baseret på det indsamlede affald stort set svarer til udbyttet efter forsortering.

Dagrenovationen er i stort set alle undersøgelser blandet med andet affald. Det er derfor vanskeligt at bedømme bidraget herfra til den endelige kvalitet af restprodukterne. I de fleste tilfælde har restprodukterne uden problemer kunne overholde gældende krav til jordbrugsanvendelsen. Kravene til restprodukterne fra bioforgasning, der ønskes anvendt i jordbruget, er dog ændret og skærpet flere gange i de sidste 10 år. Der er således stillet krav til nye stoffer ligesom tidligere krav er skærpet. Ydermere er der sket ændringer i prøvetagningsstedet for



kontrollen således at resultater fra de tidligere undersøgelser kun i mindre omfang kan benyttes til at bedømme om kildesorteret organisk dagrenovation vil kunne overholde de nu gældende krav. Der er dog en tendens til at affaldets indhold af plastblødgøreren DEHP kan give problemer med overholdelse af dagens krav.

I gennemgangen er endvidere medtaget 2 danske laboratorieforsøg udført på organisk dagrenovation. Disse undersøgelser viste et biogaspotentiale på 350-550 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton omsat affald målt som VS (glødetab).

De gennemførte undersøgelser viser at der har foregået et betydeligt udviklingsarbejde omkring bioforgasning af dagrenovation i Danmark. I forbindelse med undersøgelserne er der imidlertid kun etableret begrænset dokumentation for biogaspotentialet i organisk affald som funktion af sorteringskriterier, forsortering og procesbetingelser ved bioforgasningen ligesom viden om affaldets betydning for kvaliteten af restprodukterne er begrænset.

# 1 Indledning

Denne rapport er en systematisk sammenstilling af eksisterende danske data om biogas fra kildesorteret organisk dagrenovation med vægt på dannet gasmængde samt mængde og kvalitet af øvrige fraførsler i form af frasorteret rejekt og restfraktioner (hhv. fast og flydende). Rapporten omfatter rapporterede målinger i alle skalaer (laboratorieskala, pilotskala, fuldskala).

Det skal indledningsvis bemærkes, at der i sammenstillingen indgår resultater fra rapporter og undersøgelser, der er lavet med helt andre formål og målsætninger end den aktuelle. De forsøg, der indgår i sammenstillingen er således i de fleste tilfælde udført med henblik på teknologiudvikling og teknologiafprøvning.

Denne rapport's fokus på gasmængder samt mængde og kvalitet af fraførsler betyder, at den kun i begrænset omfang indeholder beskrivelse af de tekniske problemer og udviklingslinier, der har været en væsentlig drivkraft bag mange af de undersøgelser, som indgår ligesom der ikke foretages vurderinger af de benyttede systemløsninger.

Forsøgsresultaterne inddrages for at sikre det bedst mulige vurderingsgrundlag; men det er indlysende, at disse undersøgelser i visse tilfælde - utilsigtet - kan komme til at fremstå mangelfulde, når de indgår i den nærværende rapport's systematik.

## 1.1 Baggrund

I den energi- og miljømæssige vurdering af biogas fra organisk dagrenovation er centrale størrelser - hvor meget biogas, der dannes ved den anaerobe udrådning af affaldet - samt mængden og kvaliteten af andre fraførsler fra biogasanlægget. Sidstnævnte kan være materialer frasorteret i forbehandlingen eller i efterbehandlingen og bundfald fra diverse tanke, samt gødningsvand fra afvandingen af udrådnede materiale.

Biogasmængden, eller snarere metan-mængden, er direkte relateret til mængden af energi, der kan nyttiggøres fra affaldet, og dermed til en række af de relaterede miljøpotentialer i forhold til drivhuseffekten.

De øvrige fraførsler vil afhænge af anlæggets udformning og af kvaliteten af det tilførte affald. En frasorteret plast- og papirfraktion (rejekt) vil typisk blive tilført et forbrændingsanlæg med energiproduktion - et bundfald domineret af jord og sten vil typisk blive deponeret - en afvandet fast restfraktion vil eventuelt blive komposteret og anvendt til jordforbedring, mens en næringsrig flydende restfraktion kan udnyttes som gødning i jordbruget. De energimæssige og miljømæssige aspekter heraf vil netop afhænge af fraførslernes mængde og kvalitet. Kvaliteten kan i sig selv være afgørende for hvorledes en given massestrøm disponeres, for eksempel, om givne krav til jordbrugsanvendelse overholdes.

Organisk dagrenovation tilføres i dag kun i begrænset omfang til biogasanlæg, og stort set udelukkende til Biogasfællesanlæg, der primært behandler gylle og organisk industriaffald. Således viser Energistyrelsens statistik om driften af

biogasfællesanlæg for år 2000, at kun ca. 3.500 t dagrenovation er behandlet på de tre anlæg, der modtog affald i den periode. Kun på anlægget i Vaarst-Fjellerad udrådnes affaldet separat, således at hovedparten af affaldet behandles sammen med gylle, slam eller andre affaldstyper. Fraførslerne fra alle anlæggene sker som blandingsprodukter af de forskellige affaldstyper tilført anlægget.

Denne sammenblanding af dagrenovationen med gylle, slam eller andre affaldstyper har været dominerende gennem hele den forløbne periode, således at datamaterialet om gasmængder samt mængde og kvalitet af fraførsler alene fra organisk dagrenovation er relativt sparsomt, og i stort omfang hidrører fra særlige forsøgsperioder af begrænset varighed og med mindre affaldsmængder.

Kvaliteten af de fraførte restprodukter til jordbrugsanvendelse omfatter både oplysninger om de gødningsmæssige kvaliteter og om overholdelsen af gældende krav. Et særligt problem i denne forbindelse er at kravene til jordbrugsanvendelsen af slam og andre affaldsprodukter er ændret ganske dramatisk flere gange i det seneste 10 år.

Der er indført grænseværdier for tungmetallindholdet i forhold til fosforindholdet som supplement til de tidligere grænseværdier baseret på forholdet til affaldets tørstofindhold. Der er løbende sket stramninger for en række tungmetaller og stillet krav til nye tungmetaller. Der er indført krav til indholdet af miljøfremmede organiske stoffer og endelig er der flere gange foretaget ændringer af, hvor i processerne kontrollen skal ske, idet fokus er flyttet fra de restprodukter - der anvendes i jordbruget - til sikring af at der ikke i affaldsbehandlingen anvendes råvarer, herunder kildesorteret organisk dagrenovation, med forhøjet indhold af problemstoffer.

Når de tidligere rapporters oplysninger om restprodukternes kvalitet skal vurderes i dag, kan det derfor være vanskeligt at bedømme om produkter, der overholdt de tidligere krav, stadig ville kunne anvendes i lyset af de nu gældende krav. I bilag 1 er til orientering givet en oversigt over ændringerne i kravene til jordbrugsanvendelsen.

I vurderingen af de enkelte rapporters oplysninger er der taget udgangspunkt i dagens krav, således at der kan være modstrid mellem den vurdering, der gives i denne rapport, og de oplysninger der - helt korrekt på daværende tidspunkt - er angivet i de tilgrundliggende rapporter.

Et igangværende projekt finansieret af Miljøstyrelsen forventes i øvrigt at belyse indholdet af organiske miljøfarlige stoffer og tungmetaller i kildesorteret organisk dagrenovation nærmere.

## 1.2 Formål

Formålet med denne rapport er at etablere en systematisk sammenstilling af målte danske data om biogasmængder og mængde og kvalitet af diverse fraførsler baseret på organisk dagrenovation. Data søges i videst muligt omfang relateret tilbage til specifikke oplysninger om det indgående affald, f.eks. tons tørstof. Data etableres med henblik på en energi- og miljømæssig vurdering af bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation.

### 1.3 Metode

Denne rapport omfatter offentliggjorte undersøgelser frem til udgangen af april 2001. Rapporterede undersøgelser er søgt vurderet med hensyn til art og omfang samt art, omfang og kvalitet af målte data hvad angår tilført affald, selve biogasprocessens forløb, dannede gasmængder samt fraførte massestrømme og deres kvalitet.

Den aktuelle tekniske udformning af biogasprocessen er for systematikens skyld beskrevet i forhold til en fælles skabelon, som omtales senere i indledningen. Ligeledes er foreliggende data opgivet i tabelform efter en fælles skabelon. Som det senere fremgår af dataenes omfang, har det ikke været muligt at opstille systematiske massebalancer for de undersøgte anlæg, hvilket i en række tilfælde har vanskeliggjort vurderingen af de foreliggende data.

Det har kun i begrænset omfang været muligt at inddrage originalt datamateriale, idet de offentligt rapporterede data oftest udgøres af beregnede størrelser. Der har i en række tilfælde været taget kontakt til forfatterne af de benyttede rapporter, ligesom denne rapport i udkast har været udsendt til kommentering til de rapportforfattere, der er angivet i Bilag 2. Indkomne kommentarer fremgår også af Bilag 2.

### 1.4 Udvælgelse af rapporterede undersøgelser

I denne rapport indgår offentliggjorte undersøgelser vedrørende organisk dagrenovation på følgende pilot- og fuldskala anlæg:

- Forsøgsanlæg på Biogafællesanlæg i Sinding-Ørre, Herning.
- Fuldskalaanlæg på Biogafællesanlæg i Sinding-Ørre, Herning.
- Fuldskalaanlæg på Biogafællesanlæg i Studsgård, Herning.
- Fuldskalaanlæg på Grindsted Renseanlæg.
- Forsøgsanlæg på Vegger Biogasanlæg
- Nordsjællands Biogasanlæg, Helsingør
- Forsøgsanlæg på Vaarst-Fjellerad Biogafællesanlæg, 1998.
- Forsøgsanlæg på Vaarst-Fjellerad Biogafællesanlæg, 1999.
- Forsøgsanlæg på Vaarst-Fjellerad Biogafællesanlæg, 2000.

Følgende anlæg, som har behandlet kildesorteret organisk dagrenovation er ikke medtaget i rapporten:

- Århus Nord Biogasanlæg, Århus.
- Nysted Biogafællesanlæg, Nysted

Århus Nord er ikke medtaget, da anlægget indtil 2000 kun har modtaget ca. 80 tons affald. I foråret 2001 idriftsættes en udvidelse af anlægget til forgasning af kildesorteret organisk dagrenovation, men erfaringer herfra foreligger ikke p.t.

Nysted Biogafællesanlæg har i 1999 og 2000 modtaget mindre mængder forkomposteret og forbehandlet organisk dagrenovation fra AFAV, men erfaringerne herfra er ikke offentliggjort.

Endelig kan nævnes, at Biogafællesanlæggene Fangel, Snertinge og Hashøj overvejer at modtage forbehandlet organisk dagrenovation.

De beskrevne anlæg er opbygget meget forskelligt. Dagrenovationen er i biogasfællesanlæggene behandlet sammen med gylle og industriaffald - i Grindsted sammen med spildevandsslam og industriaffald, og i Helsingør sammen med industriaffald.

I nogle tilfælde er det tilførte kildesorterede organiske dagrenovation forbehandlet eksternt, og i andre tilfælde er affaldet ikke forbehandlet før modtagelse på biogasanlægget.

I enkelte tilfælde foreligger publicerede målinger af biogaspotentialer for dansk dagrenovation målt ved laboratorieforsøg. Disse er medtaget sidst i rapporten.

## 1.5 Systembeskrivelse og terminologi

Figur 1.5-1 illustrerer hovedelementerne i de beskrevne systemer til bioforgasning af organisk dagrenovation. De gennemgåede rapporter benytter forskellig terminologi og det har derfor været nødvendigt at opstille en fælles terminologi, som defineret i dette afsnit. Ved opstilling af terminologien har det været søgt undgået at benytte værdiladede termer.

### **Kildesorteret organisk dagrenovation**

Det organiske affald der er kildesorteret i husholdninger og separat indsamlet i egen pose, inklusive fejlsorteringer og poser til indsamling (plast, papir).

### **Forbehandling**

Forbehandling kan udgøres af poseoprivning, neddeling, magnetseparering, sigtning, udpresning i skrue- eller stempelseseparator eller lignende. Forbehandlingen kan ske på et separat anlæg eller i forbindelse med biogasanlægget. Sker der en sortering af affaldet kaldes det fjernede materiale for rejekt og det resterende materiale for forbehandlet organisk dagrenovation.

### **Forbehandlet organisk dagrenovation**

Forbehandlet organisk dagrenovation er kildesorteret organisk dagrenovation, der er forbehandlet ved for eksempel oprivning af poser, neddeling, magnetseparering, sigtning, udpresning i skrue- eller stempelseseparator og som tilføres selve biogasreaktoren. Forbehandlingen kan ske enten på et separat anlæg eller i forbindelse med biogasanlægget

### **Rejekt**

Det i forbehandlingen fjernede materiale kaldes rejekt og dette tilføres ikke biogasreaktoren. Ofte vil rejektet blive tilført et forbrændingsanlæg.

### **Biomasse**

Blandes kildesorteret organisk dagrenovation før eller efter forbehandling med anden biomasse (husdyrgødning, slam ol.) kaldes den samlede blanding biomasse.

### **Forbehandlet biomasse**

Blandes det forbehandlede organiske dagrenovation eller sker forbehandlingen sammen med anden biomasse (husdyrgødning, slam o.l.) kan det blandede produkt der tilføres biogasreaktoren betegnes som forbehandlet biomasse.

**Afgasset organisk dagrenovation**

Det organiske dagrenovation der fjernes fra biogasreaktoren kaldes afgasset organisk dagrenovation. Det afgassede organiske dagrenovation kan ved efterbehandling yderligere opdeles og afvandes.

**Afgasset biomasse**

Det forbehandlede biomasse der fjernes fra biogasreaktoren kaldes afgasset biomasse. Det afgassede biomasse kan eventuelt yderligere behandles i efterbehandlingen

**Bundfald**

Bundfaldet er sten, grus og lignende der bundfældes i pulper, blandingskamre, hygiejniseringsstanke og reaktorer og som fjernes separat.

**Flydestof**

Flydestof er materiale (skum, plast og lignende) som flyder til tops i pulpere, hygiejniseringsstanke og biogasreaktorer og som fjernes separat.

**Efterbehandling**

Efterbehandlingen kan bestå i sigtning, afvanding og lignende. Ved efterbehandlingen kan opstå en fast restfraktion og en flydende restfraktion.

**Fast restfraktion**

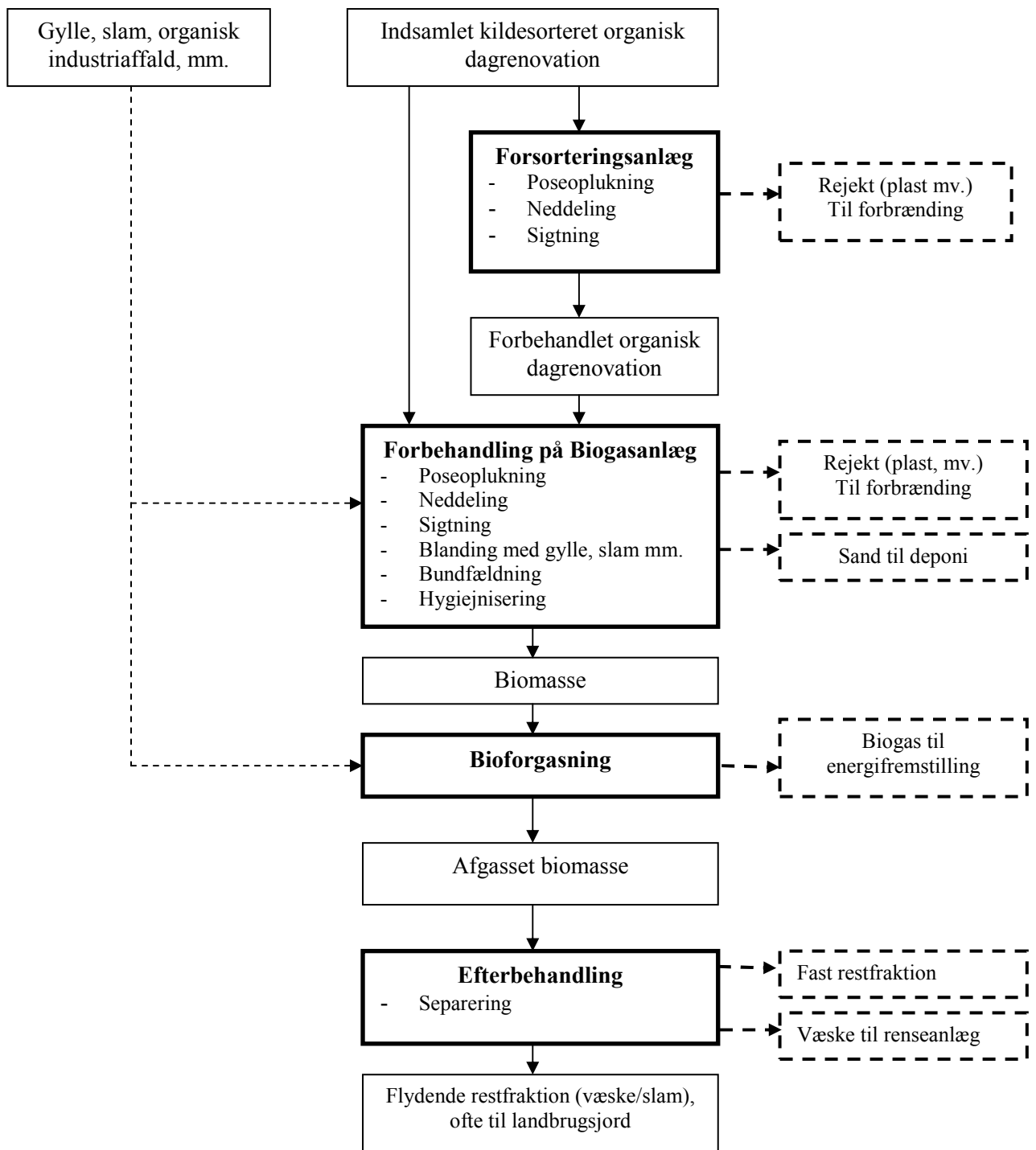
Den faste restfraktion er den fraktion af relativt fast materiale der er tilbage efter efterbehandlingen (inklusive afvanding) af det afgassede organiske dagrenovation eller biomasse. Denne fraktion håndteres enten ved forbrænding eller med henblik på anvendelse i jordbruget evt. efter yderligere behandling.

**Flydende restfraktion**

Den flydende restfraktion er den ved afvandingen opnåede vandige fraktion af det afgassede organiske dagrenovation eller biomasse. Denne fraktion behandles enten som et spildevand eller håndteres med henblik på anvendelse i jordbruget evt. efter yderligere behandling.

**Frasortering**

Frasorteringen er den samlede mængde af rejekt fra forbehandlingen, rejekt fra efterbehandlingen, bundfald og flydestof fjernet fra det kildesorterede organiske dagrenovation.



Figur 1.5-1: Grundprincip ved bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation i Danmark.

## 2 Sinding-Ørre (Herning), forsøgsanlæg

### 2.1 Indledning

Herning Kommunale Værker etablerede i 1991 – i samarbejde med Brun & Sørensen Energiteknik A/S og Marius Pedersen A/S - et forsøgsanlæg til bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation. Anlægget blev placeret på det allerede eksisterende Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg, hvor der siden 1988 er blevet produceret biogas af gylle og industriaffald.

Bioforgasningen af affaldet skete sammen med frasepareret rågylle med lavt tørstofindhold fra det eksisterende biogasfællesanlæg.

Forsøgsanlæggets havde en kapacitet til behandling af 1.000 tons kildesorteret organisk dagrenovation pr år.

Efterfølgende er beskrevet de vigtigste erfaringer fra driften af forsøgsanlægget, idet der er benyttet følgende referencer:

Miljøstyrelsens Arbejdsrapport Nr. 61 1993: ”Behandling af kildesorteret husholdningsaffald på Sinding Biogasfællesanlæg” Herning Kommunale Værker, 1993

”Forsøgsprogram vedrørende anvendelse af kildesorteret husholdningsaffald i Biogasfællesanlæg”, Herning Kommunale Værker, 1991

### 2.2 Indsamlet affald

Fra november 1991 til november 1992 blev der indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation fra forskelligartede boligtyper i Fåborg og Herning. I denne periode blev i alt 515 tons kildesorteret organisk dagrenovation behandlet på anlægget. 16% heraf måtte i perioden køres til deponi som følge af driftsstop.

Fejlsorteringsprocenten blev på baggrund af stikprøvekontroller vurderet til generelt at ligge under 2,6%. Driftspersonalet på anlægget mente dog, at fejlsorteringen var mere omfattende.

TS i det kildesorterede organiske dagrenovation blev målt til gennemsnitligt 35% og VS til ca. 75% af TS.

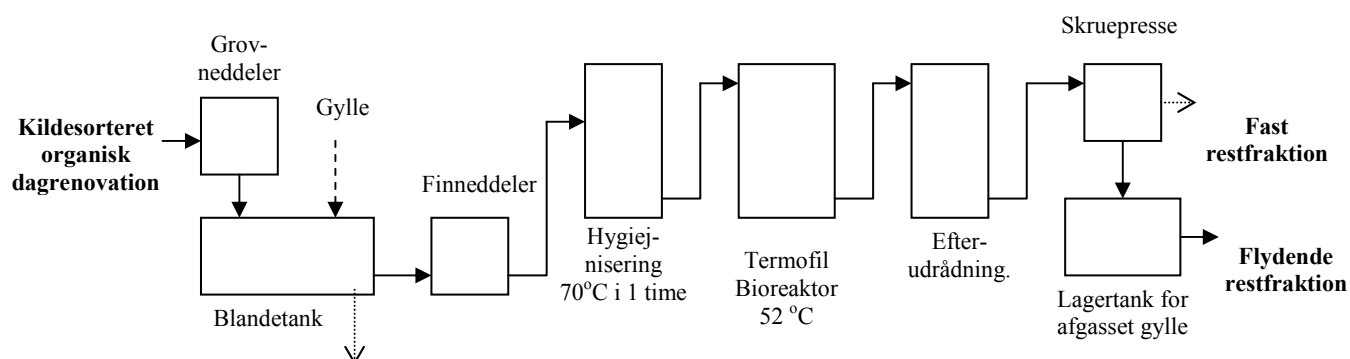
Affaldet udgjorde omkring 18% af den biomasse der tilførtes rådnetanken, men hovedparten af den samlede mængde tørstof. Efter sammenblanding med tynd gylle var tørstofindholdet på omkring 7-9%.

### 2.3 Behandlingsmetode

Det indsamlede affald blev blandet med gylle (i forholdet 1:4½) og termofilt bioforgasset (52°C).



Som det fremgår af efterfølgende figur 2.3-1, blev det indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation, uden ekstern forsoring, hældt direkte gennem en grovknuser ned i en blandetank, hvor der også blev tilført gylle. Efter yderligere neddeling blev blandingen først hygiejniseret og derefter udrådnat. Efter udrådningen blev plast og andre urenheder separeret fra.



### Bundfald til deponi

Figur 2.3-1: Skitse af forsøgsanlægget på Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg til bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation.

## 2.4 Procesdata

### Frasortering

Forbehandling af affaldet indebærer ikke nogen egentlig sortering, men alene neddeling ved hjælp af en grovknuser, placeret direkte ovenpå en blandetank, hvor der sker opblanding af affald og gylle. Efter blandetanken blev affaldet finnedelt til 5,5×10 mm. Plastic og lignende urenheder blev frasorteret efter udrådning og udgjorde her mindre end 8% (vægt) af det kildesorterede organiske dagrenovation.

Det angives i (Miljøstyrelsen, 1993), at ca. 10% af det tilførte affald (38 tons) bundfældede i blandetanken. Det fremgår ikke klart, om der er tale om en målt eller skønnet værdi.

I alt blev således frasorteret ca. 18% af det indsamlede affald.

Tabel 2.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg (forsøgsanlæg)

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons	515	Heraf 16% til deponi pga. driftsstop
Antal prøver/læs	Stk.		
Periode	-	01/11/91-31/10/92	
TS i kildesorteret dagrenovation	%	35	
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS	75	
Frasorteringsmetode	-	Ingen	
Frasorteret ved forsoring	%		
TS i forbehandlet dagrenovation	%		
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS		
TS i rejekt	%		
VS i rejekt	% af TS		
Bundfald i blandetank	%	10	Deponeres
TS i bundfald	%		
Fast restfraktion	%	8	Til forbrænding
TS i fast restfraktion	%		

### Hygiejnisering

Der blev under forsøget udtaget 14 sæt prøver før og efter hygiejnisering, efter udrådning og i lagertanken, og alle prøverne blev analyseret for salmonella og fækale streptokokker.

I prøverne efter hygiejnisering blev ikke fundet salmonella, og fækale streptokokker var typisk reduceret med en faktor  $10^3 - 10^4$ , men i 2 tilfælde dog kun med en faktor  $10^2$ . Disse to prøver blev i (Miljøstyrelsen, 1993) vurderet at skyldes indkøringsvanskeligheder.

### Gasproduktion

Opholdstiden i anlægget var omkring 20 døgn. Gasproduktion fra den termofile proces blev målt til omkring  $450 \text{ m}^3/\text{ton VS}$  (ca. 67% metan) fra blandingen af organisk affald og gylle. Denne værdi er baseret på gennemsnit af daglige gasmålinger på anlægget gennem forsøgsperioden. Ved at korrigere for det teoretiske gasudbytte fra gyllen blev et gasudbytte på ca.  $120 \text{ m}^3/\text{ton}$  kildesorteret organisk dagrenovation beregnet. Hvordan denne korrektion er foretaget, fremgår ikke klart af (Miljøstyrelsen, 1993).

Det angives i (Miljøstyrelsen, 1993), at gasmåleren ikke fungerede tilfredsstillende i de første 4-5 måneder af forsøgsperioden ligesom gasproduktionen svingede en del. Den korrigerede gasproduktion fra det organiske affald angives at have ligget mellem  $100$  og  $130 \text{ Nm}^3/\text{tons}$  kildesorteret organisk dagrenovation pga. uregelmæssig drift.

I (Miljøstyrelsen, 1993) er tilførsel af gylle og affald til anlægget opgjort på dagsbasis og det ses, at tilførslen af affald er sket uregelmæssigt.

Tabel 2.4-2: Bioforgasning, Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg (forsøgsanlæg)

	Enhed	Bemærkning
Biogas proces	-	$52^\circ\text{C}$ med gylle affald:gylle=1:4½
Reaktorvolumen	$\text{m}^3$	230
Opholdstid	Dage	20
Biogas mængde	$\text{Nm}^3/\text{ton VS}$ (blanding)	450
Biogas mængde	$\text{Nm}^3/\text{ton}$ kildesorteret dagrenovation	120
Biogas mængde	$\text{Nm}^3/\text{ton}$ forbehandlet VS	
Metan i biogas	%	67

### VFA-målinger

Der blev målt VFA-koncentrationer i anlægget. Det fremgår ikke tydeligt, præcist hvor disse værdier blev målt. Koncentrationerne var meget svingende pga. en ustabil belastning af reaktoren. Total VFA varierede fra ca.  $400 - 9000 \text{ mg/l}$ , men processtabiliteten blev i alle tilfælde genoprettet efter perioder med høje syretal.

## 2.5 Restprodukter

Den afgassede biomasse blev afsat til landbruget som gødning og indholdet af TS, VS,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , N-tot, P-tot, K, C/N forhold, Pb, Cd, Hg og Ni i restprodukterne blev derfor målt under forsøget. Resultaterne er sammenstillet i tabel 2.5-1.

Disse parametre blev ligeledes målt i kildesorteret organisk dagrenovation, rågylle, blanding (før tilførsel til reaktor) og udrådet materiale. Derudover blev målt fækale streptokokker og salmonella i alle ovennævnte fraktioner.

Alle målte tungmetalkoncentrationer i restprodukterne – målt som mg/kg P – ligger under de gældende grænseværdier for anvendelse til jordbrugsformål. Værdien for cadmium og nikkel målt i forhold til TS er over de i dag gældende grænseværdier.

Tabel 2.5-1: Restprodukter, Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg (forsøgsanlæg)

	Enhed	Fast restfraktion	Flydende restfraktion
Andel af tilført affald	%	8	82
TS	%	38	3,4
VS	% af TS	89	59
N-tot	g/kg TS	6,8	82
Ammonium-N	g/kg TS		100
P-tot	g/kg TS	4	18
K	g/kg TS	4,2	76
C/N forhold		40	2,8
Cd	mg/kg TS	0,22	0,86
Ni	mg/kg TS	17	41
Pb	mg/kg TS	8,7	24
Hg	mg/kg TS	0,05	0,11
DEHP	mg/kg TS		-
NPE	mg/kg TS		-

Ud fra de målte resultater vurderes det i (Miljøstyrelsen, 1993), at den flydende restfraktion var ren, uden fremmedstoffer og anvendelig til jordbrug.

### Andet

Energiforbruget til den samlede bioforgasning svarede til ca. 59% af den producerede energi. Det høje energiforbrug skyldtes stort elforbrug til især hygiejnisering af biomassen ved 70 °C.

## 2.6 Driftserfaringer

I forsøgsperioden var der problemer med omrøringen i fortanken, da den valgte omrører ikke gav tilstrækkelig omrøring. Udskiftning til en anden type omrører, der kunne flyttes rundt i tanken medførte store forbedringer og løste også problemet med ”døde hjørner”.

I hygiejniseringsstankene var hovedproblemet tilstopning. Tilstopning af niveaumåleren gjorde det umuligt at aflæse niveauet i tankene, ligesom aflejring af sand medførte tilstopning af selve tankene.

Også i rådnetanken var omrøringen utilstrækkelig. Her satte man en kraftigere omrører i, hvilket medførte en vridning af tanktoppen. Det ville derfor kræve en forstærkning af tanktoppen at muliggøre en tilstrækkelig omrøring i rådnetanken.

Separatoren medførte store problemer i forsøgsperioden. Den mest optimale separation blev fundet ved at foretage separeringen umiddelbart efter rådnetanken, hvor biomasse stadig var varm. Herved blev tilstopning af separatoren undgået.

De mange problemer med anlægget medførte hyppige driftsstop og dermed varierende gasudbytte.

## 2.7 Konklusion

Projektet blev gennemført på et forsøgsanlæg til afprøvning af bioforgasning af kildesorteret dagrenovation. Forsøgene blev efterfølgende videreført i anlægget efter ombygning. Se kapitel 3.

I forsøget blev det kildesorterede dagrenovation tilført blandetanken direkte uden noget tab ved forsøring. 18% af det tilførte affald blev siden frasorteret som bundfald fra fortanken (10%) og som fast restfraktion efter separation af det udrådne affald (8%).

(Miljøstyrelsen, 1993) angiver et biogasudbytte på ca. 120 Nm<sup>3</sup> fra det organiske dagrenovation. Metanindholdet var typisk 67%. Gasudbyttet er beregnet på basis af det målte samlede gasudbytte korrigeret for et teoretisk gasudbytte fra den iblandede gylle.

Der var en vis usikkerhed på gasmålingerne pga. ustabile gasmålere og en uregelmæssig drift af anlægget. Den høje målefrekvens (daglige målinger) af det totale gasudbytte mindsker dog usikkerheden. Det angivne biogasudbytte er baseret på perioder, hvor proces og målinger fungerede tilfredsstillende og er således ikke det gennemsnitligt målte under forsøget.

Forsøgsrapporterne tillader ikke en opstilling af massebalancer for forsøget, der direkte kan benyttes til at verificere gasudbyttet; men forsøgsomfang og omfang af måleprogrammets sandsynliggør det angivne resultatet.

Den flydende restfraktion overholder de i dag gældende grænseværdier for tungmetaller, selvom cadmium- og nikkelindholdet målt i forhold til tørstof er højere end dagens grænseværdier.

Der var ikke grænseværdier for miljøfremmede organiske stoffer på undersøgelsestidspunktet.



## 3 Sinding-Ørre (Herning), fuldskalaanlæg

### 3.1 Indledning

Herning Kommunale Værkers pilotanlæg til bioforgasning af organisk affald, som er beskrevet i kapitel 2, blev ombygget til et fuldskalaanlæg med støtte fra Energi- og Miljøstyrelsen.

Anlægget blev sat i drift i februar 1994 og kan behandle 300 tons organisk affald om måneden fortyndet med gylle med lavt tørstofindhold.

Til nedenstående beskrivelse af erfaringer fra driften af anlægget er benyttet følgende reference:

”Fuldskalaanlæg til behandling af kildesorteret husholdningsaffald på biogasanlæg Sinding-Ørre”, Henrik B. Møller et al, Herning Kommunale Værker, Januar 1995.

### 3.2 Indsamlet affald

Det beskrevne forsøg løb fra marts til december 1994, hvor der i alt blev behandlet 1.521 tons kildesorteret organisk dagrenovation. Hovedparten af affaldet var indsamlet i Århus.

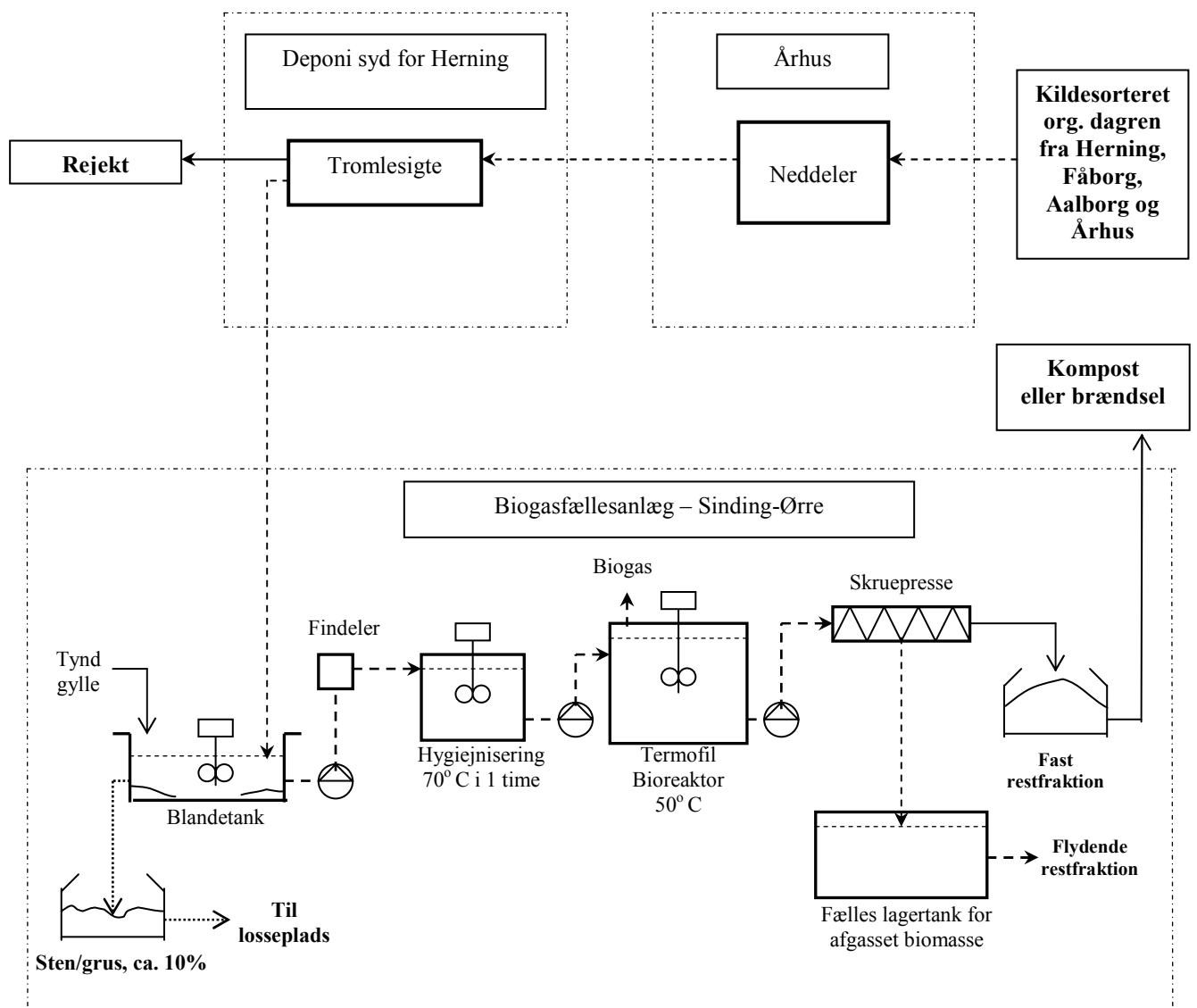
### 3.3 Behandlingsmetode

Det fremgår ikke direkte af (Møller et al, 1995), ved hvilken temperatur bioforgasningen foregik, men i (Miljøstyrelsen, 1999) beskrives Sinding-Ørre anlægget som et termofilt anlæg (ca. 50°C), hvor organisk affald bioforgasses sammen med gylle.

Som det fremgår af figur 3.3-1, blev det indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation først neddelt på et anlæg i Århus og derefter forbehandlet i en tromlesigte på et deponi nær Herning. Det forbehandlede organiske dagrenovation blev derefter tilført anlægget i Sinding-Ørre, hvor det blev blandet med gylle i blandetanken i forholdet 1:4.

I blandetanken blev en del sten og grus bundfældet. Dette bundfald blev lejlighedsvis fjernet fra tanken. Herefter blev blandingen hygiejniseret i minimum en time ved 70°C. Den reelle opholdstid i hygiejniseringsstanken var væsentligt længere end en time og derfor skete en del hydrolyse og syredannelse her. Efter bioforgasning i reaktoren blev restfraktionen separeret i en fast- og en flydende restfraktion.

Den flydende restfraktionen blev tilført landbrugsjord sammen med gyllen, mens den faste restfraktion enten blev brugt som kompost eller kørt til affaldsforbrændingsanlæg.



Figur3.3-1: Skitse af Sinding-Ørre fuldskalaanlæg til bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation i 1995.

### 3.4 Procesdata

#### Frasortering

Hverken forsortering eller neddeling foregik på anlægget, da det gav for store arbejdsmiljømæssige gener. Neddelingen af affaldet foregik i Århus, mens frasorteringen af plast fandt sted på et nærliggende deponi i en tromlesigte. Herfra blev det forbehandlede organiske dagrenovation overført til biogasanlægget.

Ved forsorteringen blev fjernet omkring 14% af det indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation.

I blandetanken fjernedes omkring 7% af den tilførte blanding (sandsynligvis hovedsagelig tungere komponenter som grus og sten) ved bundfældning, mens den faste restfraktion efter udrådning udgjorde 6%.

Tabel 3.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg (fuldskalaanlæg)

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons	1521	
Antal prøver/læs	Stk.		
Periode	-	marts-dec. 1994	
TS i kildesorteret dagrenovation	%	ca. 35	
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS		
Forsorteringsmetode	-	Tromlesigte	
Frasorteret ved forsortering	%	14	Plast mm.
TS i forbehandlet dagrenovation	%		
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS		
TS i rejekt	%		
VS i rejekt	% af TS		
Bundfald i blandetank	%	7	Deponeres
TS i bundfald	%		
Fast restfraktion	%	6	
TS i fast restfraktion	%	41	

### Hygiejniserings

Der blev i 1994 udtaget 9 sæt prøver før og efter hygiejniserings, efter udrådning og i lagertanken, og alle prøverne blev analyseret for salmonella og fækale streptokokker.

I prøverne efter hygiejniserings blev ikke fundet salmonella, og fækale streptokokker var typisk < 10 og i alle prøver under 200.

### Gasproduktion

Opholdstiden i reaktoren var omkring 14 dage. Den samlede gasproduktion fra anlægget måltes dagligt og er i (Møller et al, 1995) opgivet for oktober, november og december 1994 - summeret pr. måned.

Gasproduktionen fra affaldet blev i (Møller et al, 1995) beregnet ved at trække det teoretiske gasudbytte fra den tilsatte gylle og industriaffald fra den målte gasproduktion, og herefter fordele den resterende mængde gas på den tilførte mængde kildesorterede organiske dagrenovation.

I (Møller et al, 1995) angives en beregnet biogasproduktion fra den organiske dagrenovation på 150-160 Nm<sup>3</sup>/tons affald. Det angives ikke, om der er tale om indsamlet eller forbehandlet affald. Det i (Møller et al, 1995) angivne gasudbytte stemmer ikke med bilagene i samme rapport, hvor resultatet af beregningerne tydeligt er ændret til 135 Nm<sup>3</sup>/tons forbehandlet organisk dagrenovation. Det ændrede gasudbytte for det forhandlede organiske dagrenovation er telefonisk godkendt af rapportens forfatter, idet bilagene formentlig er ændret i forbindelse med trykningen af rapporten

Ved beregning af gasproduktionen i forhold til den indsamlede affaldsmængde, må der tages hensyn til forsorteringen, hvor 14% (vægt) af affaldet frasorteres. Dette svarer til et gasudbytte på 116 Nm<sup>3</sup>/tons tilført kildesorteret organisk dagrenovation.

Det angivne gasudbytte fra organisk affald er baseret på gasmålinger fra december 1994. Biogassens metanindhold blev målt til 62-69%.

De tilførte mængder affald og gylle blev registreret dagligt, ligesom der måltes TS og VS ved indløbet til reaktoren og igen på den afgassede biomasse. TS og VS er ikke opgivet for affaldsfraktionen alene, hvilket medfører, at det reelt ikke vides, hvor meget VS i reaktoren, der stammer herfra.



Tabel 3.4-2: Bioforgasning, Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg (fuldskalaanlæg)

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	50° med gylle	Affald:gylle 1:4
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	750	
Opholdstid	Dage	14	
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagren.	116	Rettelser i rapport
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS		
Metan i biogas	%	62-69	

### VFA-målinger

Der blev målt VFA-koncentrationer ca. to gange ugentligt i den reaktor, hvor der blev kørt med organisk dagrenovation. Desuden blev der jævnligt målt VFA i blandetanken og i hygiejniseringsstanken. Koncentrationerne i reaktoren svingede mellem 0 og 1.813 mg/l, mens koncentrationsniveauet i blandetanken og hygiejniseringsstanken lå omkring 4.000 mg/l.

De højeste syretal i reaktoren gav alvorlige procesmæssige problemer i juli 1994. Problemerne var ikke forårsaget af dagrenovationen, men for stor tilførsel af gylle fra de øvrige reaktorer, hvor der var driftsmæssige problemer.

### Restprodukter

Både den faste og den flydende restfraktion blev benyttet til jordbrugsformål, men det var planen senere at brænde den faste restfraktion, da den ikke var ligeså ren som den flydende.

Indholdet af tungmetaller blev målt en gang om måneden i både til- og fraførsel fra reaktoren. Det angives, at alle målinger viser koncentrationer under de gældende grænseværdier, men data er ikke vist.

Tabel 3.4-3: Restprodukter, Sinding-Ørre Biogasfællesanlæg (fuldskalaanlæg)

	Enhed	Fast restfraktion	Flydende restfraktion
Andel af tilført affald	%	6	55
TS	%	41	2,5
VS	% af TS	82	68
N-tot	g/kg TS		
P-tot	g/kg TS		
K	g/kg TS		
Cd	mg/kg TS		
Ni	mg/kg TS		
Pb	mg/kg TS		
Hg	mg/kg TS		
DEHP	mg/kg TS		
NPE	mg/kg TS		

### 3.5 Driftserfaringer

I forsøgsperioden var der problemer med at skaffe tilstrækkelige mængder kildesorteret organisk dagrenovation til anlægget. Desuden var affaldet af varierende kvalitet med stort indhold af plast, haveaffald, grus og sten, hvilket betød frasortering af store mængder plast, sand og grus.

Lugtgener medførte, at anlægget måtte lukkes ned to måneder i sommerperioden.

### 3.6 Konklusion

Anlægget er det ombyggede forsøgsanlæg beskrevet i kapitel 2. Det kildesorterede dagrenovation blev neddelt og forbehandlet inden det blev tilført anlægget og blandet med tynd gylle inden bioforgasning.

I forsøget blev det kildesorterede dagrenovation forbehandlet i tromlesigte i Herning inden tilførsel til blandetank. 14% af affaldet blev frasorteret i tromlesigten. 7% blev fjernet som bundfald fra blandetanken og 6% blev fjernet ved separation efter udrådning.

Biogasudbyttet kan ud fra (Møller et al, 1995) angivelser beregnes til  $135 \text{ Nm}^3$  fra det modtagne forbehandlede kildesorterede organiske dagrenovation. Med 14% frasortering fås at gasudbyttet bliver  $116 \text{ Nm}^3$  /ton kildesorteret organiske dagrenovation. Metanindholdet var typisk 62-69%.

Der blev ikke foretaget målinger af VS i de enkelte fraktioner (dagrenovation, industriaffald og gylle) inden sammenblanding, og det vides derfor ikke, hvor meget VS, der stammer fra tilført dagrenovation. Gasudbyttet for dagrenovationen er beregnet på basis af det målte samlede gasudbytte korrigeret for et teoretisk gasudbytte fra gylle og industriaffald (fedt og blegejord). Da bidraget fra dagrenovationen er fremkommet som en rest, hvor det samlede gasudbytte er fratrukket et teoretisk beregnet udbytte fra betydelige mængder gylle og industriaffald er resultatet behæftet med stor usikkerhed.

Der var en vis usikkerhed på gasmålingerne pga. ustabile gasmålere og uregelmæssig drift af anlægget. Den høje målefrekvens (daglige målinger) af det totale gasudbytte mindsker dog usikkerheden. Det angivne biogasudbytte er baseret på 1 måneds drift, hvor proces og målinger fungerede tilfredsstillende og er således ikke det gennemsnitligt målte under forsøget.

Forsøgsrapporterne tillader ikke en opstilling af massebalancer for forsøget, der kan benyttes til at verificere gasudbyttet.

Den flydende restfraktion angives at have overholdt de daværende grænseværdier for tungmetaller; men der er ikke angivet resultater fra forsøgsperioden.

Der var ikke grænseværdier for miljøfremmede organiske stoffer på undersøgelsestidspunktet



# 4 Studsgård Biogasanlæg (Herning)

## 4.1 Indledning

Studsgård Biogasanlæg er placeret syd for Herning ved Studsgård by. Anlægget er etableret i 1996 af Herning Kommunale Værker ud fra erfaringer fra driften af Sinding-Ørre Biogasanlæg. Anlægget bioforgasser organisk dagrenovation sammen med husdyrgødning og industriaffald.

Det angives, at anlægget har en årlig kapacitet på 113.000 tons gylle fra landbruget, 9.000 tons industriaffald og 7.000 tons organisk dagrenovation (forbehandlet).

Det tilhørende forbehandlingsanlæg (rullesigte), placeret på forbrændingsanlægget, Knudmoseværket, har kapacitet til at behandle 11.000 tons organisk affald på årsbasis (det dobbelte ved skifteholdsdrift).

Til beskrivelse af driften af anlægget er benyttet følgende referencer:

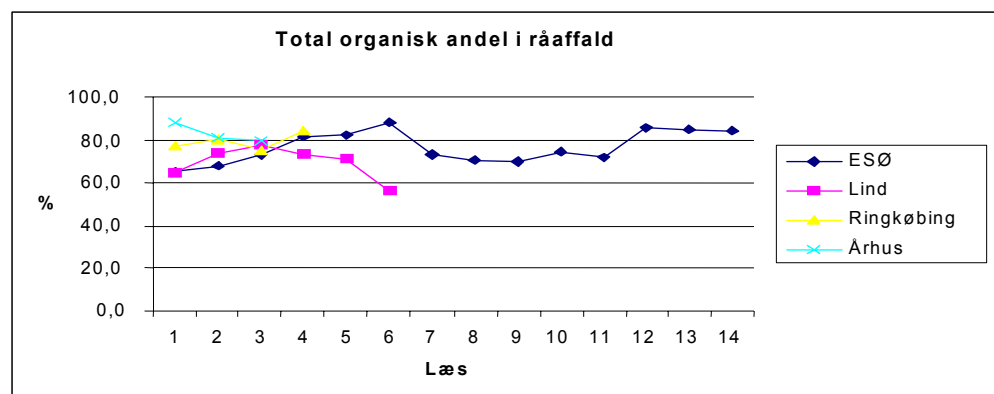
”Bioforgasning: eksempel”, artikel af Henrik Ørtenblad, Herning Kommunale Værker, Herning, Affaldsteknologi, Thomas H. Christensen (red.), Teknisk Forlag, 1998

”Personlige oplysninger fra Henrik Ørtenblad, Herning Kommunale Værker, vedrørende driftserfaringer på Studsgård Biogasanlæg, samt kvalitet af tilført affald. April 2001.”

## 4.2 Indsamlet affald

I år 2000 blev der modtaget 2.700 tons forbehandlet organisk dagrenovation på Studsgård. Ud over affald fra Herning og omegn har der lejlighedsvis været behandlet affald fra bl.a. Århus, Aalborg og Nordsjælland.

Det tilførte kildesorterede organiske dagrenovation er oplyst at have en andel af organiske komponenter (madaffald, papir og lignende) på 75%, som det fremgår af figur 4.2-1, der viser sorteringsresultater fra udvalgte læs tilført kildesorteret organisk dagrenovation fra en igangværende undersøgelse af affaldskvaliteten.

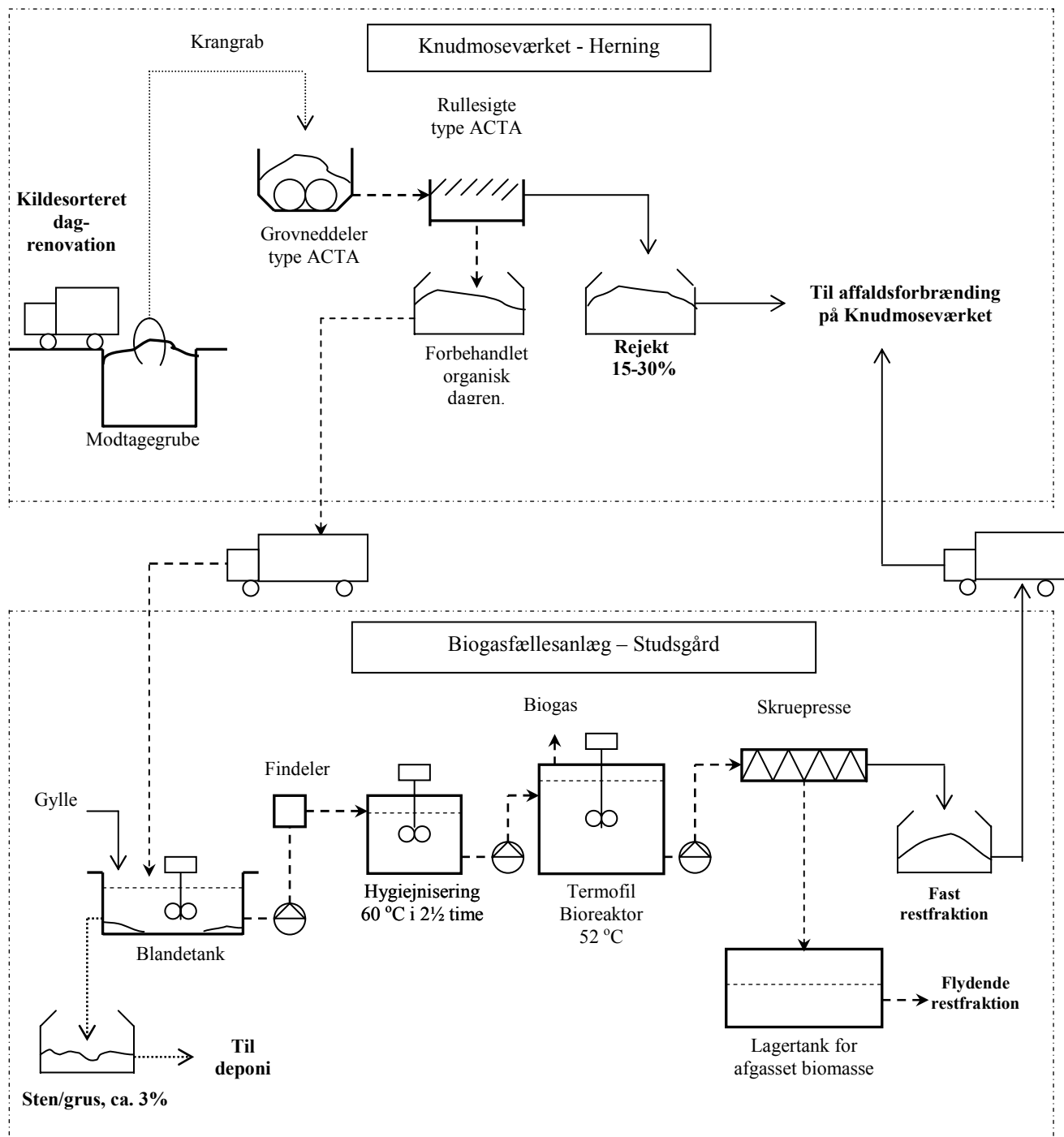


Figur4.2-1: Organisk andel af tilført kildesorteret organisk dagrenovation.

### 4.3 Behandlingsmetode

Studsgård Biogasanlæg supplerede i 1996 Sinding-Ørre Biogasanlæg som et anlæg med mulighed for termofil bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation sammen med gylle og industriaffald. Efter etablering af Studsgård Biogasanlæg blev kildesorteret organisk dagrenovation kun behandlet her.

I figur 4.3-1 er hele behandlingsforløbet skitseret fra indsamling til udspredning af afgasset biomasse på landbrugsjord.



Figur 4.3-1: Skitse af Studsgård fuldskalaanlæg til bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation, incl. forsoring.

Forsorteringen af det indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation sker på affaldsforbrændingsanlægget, Knudmoseværket i Herning. forbehandlingsanlægget består af en neddel og en rullsigte, hvorfra rejektet føres direkte til forbrænding og biomassen køres til Studsgård.

Som det fremgår af figur 4.3-1, blandes det forhandlede organiske dagrenovation med gylle i blandetanken ved ankomsten til Studsgård Biogasanlæg. Efter blandetanken bliver blandingen findelt og hygiejniseret ved 60°C i minimum 2,5 timer eller ved 70°C i mindst 1 time. Herefter bioforgasses blandingen i en af anlæggets reaktorer. Efter bioforgasningen separeres restfraktionen i en fast restfraktion (til forbrænding) og flydende restfraktion (til landbrug).

Anlægget har to reaktorer (2×3.300 m<sup>3</sup>), hvoraf kun en reaktor kører med dagrenovation, således at ikke alt afgasset materiale skal efterbehandles. Der er opnået Europæisk patent på denne måde at behandle dagrenovation.

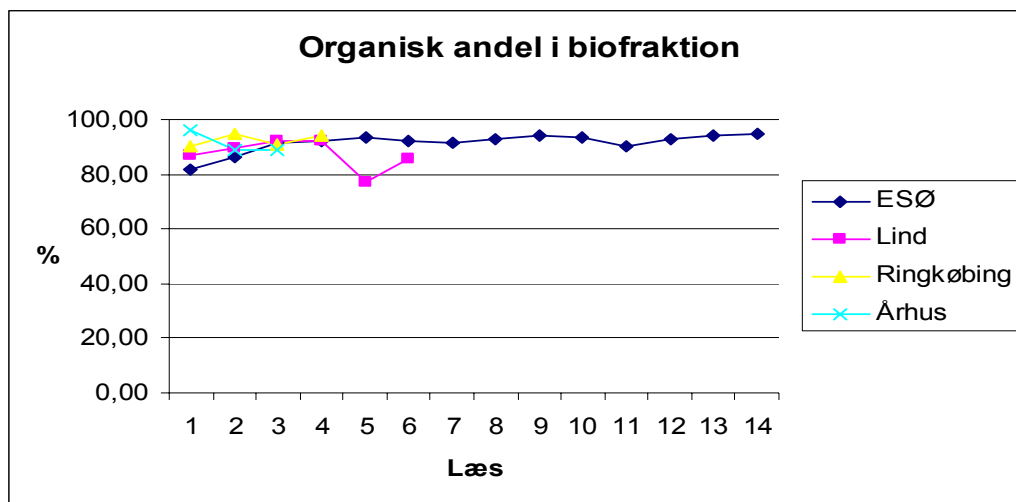
#### 4.4 Procesdata

##### Frasortering

Rejektet fra forsorteringen angives i (Ørtenblad, 1998) at udgøre ca.15% af det tilførte affalds vægt, men det er efterfølgende oplyst, at det i forsorteringen i dag tilstræbes at optimere på kvaliteten af biomassen og ikke på mængden af rejektet. Herved øges rejektmængden til omkring 30% afhængig af affaldets kvalitet.

Der frasorteres derudover ca. 3% som sand/grus i blandetanken og ca. 2% som fast restfraktion ved separeringen efter rådnetanken. En stor del af denne frasortering skyldes dog halm og sand fra gyllen.

Det tilførte forhandlede organiske dagrenovation er oplyst at have en andel af organiske komponenter (madaffald, papir og lignende) på omkring 90%, som det fremgår af figur 4.4-1, der viser resultater fra en igangværende undersøgelse af affaldets kvalitet. Desuden er der et vist indhold af uorganiske komponenter (plast, ølkapsler mv.).



Figur 4.4-1: Organisk andel i forbehandlet organisk dagrenovation.

Tabel 4.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Studsgård Biogasanlæg

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons		Ikke oplyst
Antal prøver/læs	Stk.		
Periode	-		
TS i kildesorteret dagrenovation	%		Ikke målt
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS	ca. 75	Udsorteringsforsøg
Forsorteringsmetode	-	Rullesigte+neddelere	
Frasorteret ved forsortering	%	15-30	Plast mm.
TS i forbehandlet dagrenovation	%	ca. 29	Analyse af 1 prøve
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS	ca. 90	Analyse af et 1 læs
TS i rejekt	%		
VS i rejekt	% af TS		
Bundfald i blandetank	%	3	Deponeres
TS i bundfald	%		
Fast restfraktion	%	2	Forbrændes
TS i fast restfraktion	%	35-45	

Det tilførte forbehandlede organiske dagrenovation analyseres iht. anlæggets miljøgodkendelse hver anden måned for tungmetaller og miljøfremmede stoffer. Et eksempel på de opnåede resultater er gengivet i tabel 4.4-3.

Tabel 4.4-2: Forbehandlet organisk dagrenovation på Studsgård Biogasanlæg

	Enhed	Forbehandlet organisk HHA	Bemærkning
TS	%	28,9	
Cd	mg/kg TS	0,1	
Ni	mg/kg TS	< 5	
Pb	mg/kg TS	< 7	
Hg	mg/kg TS	< 0,1	
DEHP	mg/kg TS	2	
NPE (sum)	mg/kg TS	3,1	
LAS	mg/kg TS	< 50	
∑ PAH	mg/kg TS	0,2	

Det fremgår heraf, at det analyserede forbehandlede organiske dagrenovation overholder de gældende grænse- og afskæringsværdier for udspreddning på landbrugsjord med stor margin.

### Hygiejniserings

Hygiejniseringsen sker ved 60°C i 2½ time eller ved 70°C i 1 time, svarende til de gældende krav for kontrolleret hygiejniserings.

### Gasproduktion

Opholdstiden i reaktoren var omkring 16 dage. Gasudbyttet vurderes i (Ørtenblad, 1998) at være 150 Nm<sup>3</sup> biogas/tons kildesorteret organisk dagrenovation (65% metan). Ifølge telefonisk oplysning fra artiklens forfatter var dette et skøn, som blev overført fra erfaringerne fra Sinding-Ørre Biogasanlæg.

Tabel 4.4-3: Bioforgasning, Studsgård Biogasanlæg

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	Termofil med gylle	
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	2*3.300	
Opholdstid	Dage	16	
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagren.		Skøn på 150 fra Sinding-Ørre
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS		
Metan i biogas	%	65	

### **VFA-målinger**

VFA målinger på anlægget lå omkring 2.000 mg/l. Der blev målt ca. hver 14. dag på gaskromatograf.

### **Restprodukter**

Den faste restfraktion sendes til forbrænding på Knudmoseværket, mens den flydende restfraktion afsættes til landbrugsformål. TS-indholdet for den faste restfraktion er målt til 39%.

Der blev ikke målt for tungmetaller og miljøfremmede stoffer i restprodukterne, da dette ikke kræves efter de gældende regler. I stedet skal det tilførte forbehandlede organiske dagrenovation analyseres hver anden måned ifølge anlæggets miljøgodkendelse. Et eksempel på en analyse af det forbehandlede organiske dagrenovation er gengivet i tabel 4.4-2.

## **4.5 Driftserfaringer**

Det største problem på anlægget har været den varierende kvalitet af det tilførte kildesorterede organiske dagrenovation. De mange uorganiske materialer i biomassen har ført til problemer med omrøring, tilstopning af finnedeler og varmeveksler, flydelag i reaktoren og lignende.

Disse problemer er forsøgt løst med bedre forsortering, bedre omrørere og flere parallelle linier til f.eks. finnedeling for at forhindre driftsstop.

## **4.6 Konklusion**

Studsgård Biogasanlæg var på undersøgelsestidspunktet - og er det stadig - et fuldskalaanlæg i almindelig drift.

Det forbehandlede affald modtages fra forbehandlingsanlægget på Knudmoseværket, hvor 15-30% af affaldet frasorteres. Frasorteringen afhænger både af affaldets kvalitet; men også af om driften optimeres efter at opnå så lille frasortering som muligt eller efter så god kvalitet af affaldet som muligt. Der frasorteres således større mængder i dag, hvor der tilstræbes at så rent affald som muligt.

Udover forsorteringen på Knudmoseværket frasorteres ca. 3% sand og grus fra blandetanken og ca. 2% som fast restfraktion efter rådnnetanken.

Der er ikke i rapporten eller fra driften nye målinger, der kan dokumentere gasudbyttet fra dagrenovationen.

Det forbehandlede affald overholder de gældende grænseværdier for tungmetaller og afskæringsværdierne for organiske miljøfarlige stoffer med stor margin.

Gasudbyttet fra dagrenovationen er ikke målt separat på Studsgård Biogasfællesanlæg.





# 5 Grindsted Renseanlæg

## 5.1 Indledning

På Grindsted Renseanlæg har det siden februar 1997 været muligt at udrådne kildesorteret organisk dagrenovation sammen med spildevandsslam. Bioforgasning af organisk dagrenovation indgår som en del af kommunens grønne tiltag og anlægget angives at have kapacitet til behandling af 5.000 tons affald/år sammen med 20-30.000 tons slam/år.

Nedenstående beskrivelse er baseret på følgende referencer:

Artikel fra Ren Viden, nr. 4, 1998

Foredragsnotat fra Bjarne Bro, Nordisk Spildevandskonference, Hvidovre 2001

Telefoniske oplysninger fra Bjarne Bro, Grindsted Kommune, 2001.

## 5.2 Indsamlet affald

Siden februar 1997 er der årligt indsamlet ca. 1.200 tons kildesorteret organisk dagrenovation fra 6.200 husholdninger i Grindsted kommune. Affaldet indsamles i papirposer.

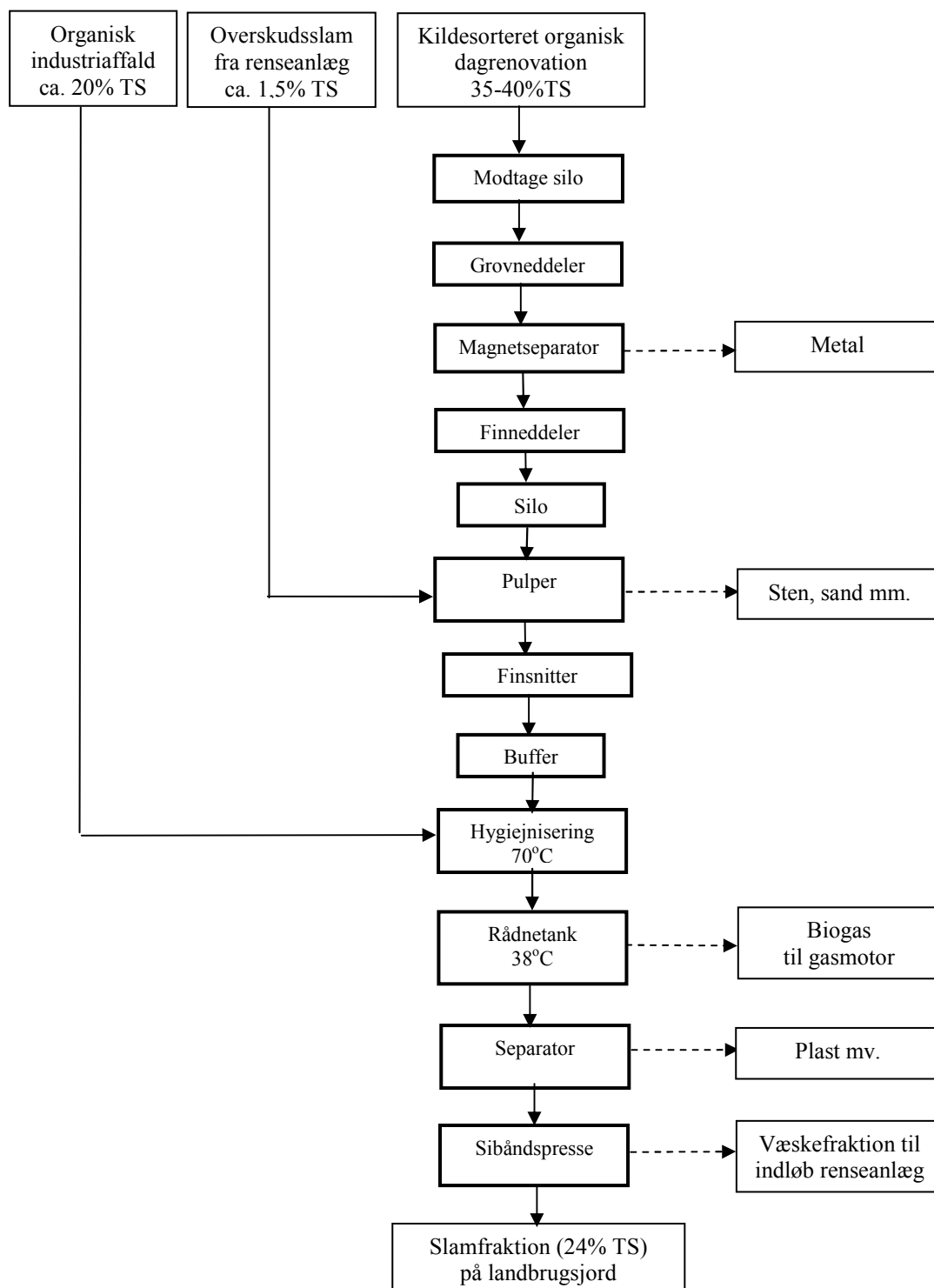
Tabel 5.2-1: Kildesorteret organisk dagrenovation, Grindsted Renseanlæg

	Enhed	Kildesorteret organisk HHA	Bemærkning
TS	%	36,2	
VS	% af TS	87,8	
COD	g/kg	420	
N-tot	% af TS	2,3	
P-tot	% af TS	0,6	
K	% af TS	0,9	
Cd	mg/kg TS	0,09	
Ni	mg/kg TS	4	
Pb	mg/kg TS	< 6	
Hg	mg/kg TS	<0,05	
Zn	mg/kg TS	46	
Cu	mg/kg TS	20	
Cr	mg/kg TS	5,2	
Cd	mg/kg P	15	
Ni	mg/kg P	660	
Pb	mg/kg P	983	
Hg	mg/kg P	<8	
DEHP	mg/kg TS	11	
NPE	mg/kg TS	3,4	
LAS	mg/kg TS	<50	
∑ PAH	mg/kg TS	<0,2	

Det modtagne dagrenovation har typisk et tørstofindhold på 35-40% TS (Bro, 2001). En analyse af sammenblandede stikprøver udtaget over en uge i oktober 2000 af det modtagne dagrenovation (efter neddeling) er gengivet i tabel 5.2-1. Prøven viser, at affaldet overholder de gældende krav med stor margin.

### 5.3 Behandlingsmetode

På Grindsted Renseanlæg bliver det kildesorterede organiske dagrenovation udrådnat mesofilt (38°C) sammen med overskudsslam fra spildevandsbehandlingen og organisk industriaffald. Blandingsforholdet (baseret på TS) er ca. 45% slam, ca. 35% dagrenovation og ca. 20% industriaffald.



Figur 5.3-1: Principdiagram af anlæg til bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation på Grindsted Renseanlæg.

Som vist på figur 5.3-1 aflæses det kildesorterede organiske dagrenovation direkte i en modtagesilo på reneanlægget. Herfra passerer dagrenovationen en grovned-

deler, en magnetseparator og en finneddeler før det pumpes til en pulper. I pulperen blandes affaldet med overskudsslam fra Grindsted renseanlæg og fra bunden af pulperen udtages bundfældede tunge partikler som sten og sand.

Fra pulperen pumpes den forbehandlede organiske dagrenovation via en finsnitter til en hygiejniseringskammer, hvor det blandes med industriaffald og hygiejniseres ved 70°C. Herefter bioforgasses biomassen mesofilt i en rådnetank ved 38°C, og efter udrådning passerer den afgassede biomasse endnu en separator, hvor der primært frasorteres plast.

Den sidste proces er afvanding i en traditionel sibåndspresse, som deler biomassen i en væskefase, som returneres til renseanlæggets indløb og en slamfraktion med ca. 24% TS, som udspreddes på landbrugsjord efter oplagring på et slamlager.

#### 5.4 Procesdata

##### Frasortering

Det anvendte organiske affald er indsamlet i papirsposer, således at anlægget ikke har problemer med at fjerne plasten fra indsamlingsposer.

Frasorteringen før udrådning sker på selve renseanlægget ved fraseparering af metaldele vha. en magnetisk separator, neddeling af affaldet efterfulgt af blanding med spildevandsslam i en pulper, hvorfra tunge materialer udtages. Der frasorteres i alt ca. 12 tons/år før udrådningen. Efter udrådningen frasorteres ca. 12 tons plast/år svarende til ca. 1% af det modtagne affald. Derudover returneres en væskefraktion fra slampressen til renseanlæggets indløb.

Tabel 5.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Grindsted Renseanlæg

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons/år	1.200	ekskl. slam og industriaffald
Antal prøver/læs	Stk.		
Periode	-	1997 ->	
TS i kildesorteret dagrenovation	%	36,2	Målt gennemsnit over en uge
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS	87,8	Målt gennemsnit over en uge
COD i kildesorteret dagrenovation	g/kg	420	Målt gennemsnit over en uge
Forsorteringsmetode	-	Magnet+neddeler+pulping	På renseanlægget
Frasorteret ved forsortering	%	1	Metal + sten+sand
TS i forbeholdt dagrenovation	%		
VS i forbeholdt dagrenovation	% af TS		
TS i rejekt	%		
VS i rejekt	% af TS		
Fast restfraktion	%	1	Plast mm.
TS i fast restfraktion	%		

##### Hygiejniserings

Hele biomassen er hygiejniseret ved 70°C i minimum en time, svarende til de gældende krav for kontrolleret hygiejniserings.

##### Gasproduktion

Den samlede gasproduktion fra blandingen af slam og affald er målt til 490 Nm<sup>3</sup>/tons tilført VS til den mesofile proces (38°C). Der foreligger ikke målinger af gasudbyttet fra dagrenovationen alene, men DTU har udført laboratorieforsøg med bioforgasning af organisk dagrenovation fra Grindsted. Dette forsøg er dog ikke afrapporteret.

Forudsættes 80% nedbrydning af affaldets organiske indhold under den mesofile proces og et COD indhold – som målt – på 420 g/kg kan beregnes et teoretisk

gasudbytte på ca. 180 Nm<sup>3</sup> biogas med 65% CH<sub>4</sub>/tons kildesorteret organisk dagrenovation.

Tabel 5.4-2: Bioforgasning, Grindsted Renseanlæg

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	Mesofil (38°C)	Blanding af affald og slam
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	2.800	
Opholdstid	Dage	30	
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagren.		Ikke dokumenteret
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS	490	Blanding af affald og slam
Metan i biogas	%	65	Ikke oplyst

### VFA-målinger

Anlægget udfører rutinemæssigt måling af VFA og niveauet er typisk 100-300 mg/l målt som eddikesyre.

### Restprodukter

Den faste restfraktion (her slammet) afsættes til landbruget, mens den flydende restfraktion fra sibåndspresen føres tilbage til rensesanlægget. I referencerne er ikke angivet måleresultater for den flydende væskefraktion, men en del kvælstof føres til rensesanlægget, hvor det indgår i kvælstoffjernelsesprocessen. Det anvendes således ikke som gødning.

I tabel 5.4-3 er angivet analyseresultater af den faste restfraktion (slamfraktionen). Der er tale om middelværdi for de sidste 24 månedsprøver. Det fremgår heraf, at den faste restfraktion overholder de gældende grænseværdier for udspreddning på landbrugsjord.

Tabel 5.4-3: Restprodukter, Grindsted Renseanlæg

	Enhed	Fast restfraktion	Flydende restfraktion
Andel af tilført affald	%		
TS	%	24	
VS	% af TS	60,7	
N-tot	g/kg TS	43	
P-tot	g/kg TS	30	
K	g/kg TS	1,8	
Cd	mg/kg TS	2,2	
Ni	mg/kg TS	42	
Pb	mg/kg TS	65	
Hg	mg/kg TS	1	
Cd	mg/kg P	79	
Ni	mg/kg P	1334	
Pb	mg/kg P	2319	
Hg	mg/kg P	34	
DEHP	mg/kg TS	27	
NPE	mg/kg TS	10	
LAS	mg/kg TS	793	
Σ PAH	mg/kg TS	1,6	

## 5.5 Driftserfaringer

Der er i referencerne beskrevet nogle få driftsmæssige problemer:

- Problemer med pumper, der ikke kan tåle den høje temperatur af biomassen efter hygiejnisering
- Tilstopning af neddelere
- Problemer med varmevekslerens kapacitet
- Vanskeligheder med at opnå højt TS i rådnetanken

Generelt konkluderes, at samudrådning af slam og kildesorteret organisk dagrenovation er praktisk muligt.

## 5.6 Konklusion

Grindsted Renseanlæg er et normalt kommunalt renselæg i almindelig drift. Kildesorteret dagrenovation modtages og behandles sammen med renselæggets almindelige slam og organisk industriaffald.

Den kildesorterede dagrenovation forbehandles kun i meget begrænset omfang idet indsamlingen og sorteringskriterierne fører til et meget rent produkt. Således frasorteres ca. 1% i forbindelse med neddeling og magnetseparering ved modtagelsen og ca. 1 % ved separation efter udrådning. Den flydende restfraktion føres tilbage til rensningsanlægget og anvendes således ikke som gødning.

Der foreligger ikke målinger af gasudbyttet fra dagrenovationen alene, men på baggrund af oplysninger om affaldets COD-indhold kan der beregnes et forventet gasudbytte på ca. 180 Nm<sup>3</sup> biogas med 65% CH<sub>4</sub>/tons kildesorteret organisk dagrenovation.

Det forbehandlede affald overholder de gældende grænseværdier for tungmetaller og afskæringsværdierne for organiske miljøfarlige stoffer med stor margin.



# 6 Vegger Biogasanlæg

## 6.1 Indledning

I 1990 indgik Aalborg kommune og Jysk Biogas aftale om en forsøgsordning med afgangning af indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation fra kommunen. Denne aftale resulterede i opførelsen af et pilotanlæg til afgangning af organisk dagrenovation fra omkring 3.000 husstande sammen med gylle, industriaffald og blegejord på det allerede eksisterende Vegger Biogasfællesanlæg.

De væsentligste erfaringer fra driften af pilotanlægget beskrives ud fra følgende referencer:

”Behandling af kildesorteret organisk dagrenovation på Vegger Biogasanlæg”, Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, Nr. 8, 1995

Keld Johansen, Jysk Biogas, personlig kommunikation, 2001.

## 6.2 Indsamlet affald

Fra juli 1992 til marts 1993 blev indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation fra 3.000 husstande. I alt blev indsamlet 283 tons affald.

Skillelinien for affaldssorteringen gik ved køkkendøren, dvs. at f.eks. bleer og haveaffald ikke var ønsket i anlægget. Stikprøvekontroller af det indsamlede affald viste fejlsorteringsprocenter på omkring 4%. Affaldets TS-indhold blev i (Miljøstyrelsen, 1995) skønnet at ligge mellem 25 og 40%.

I et beregningseksempel i (Miljøstyrelsen, 1995) antages det, at reaktorerne tilførtes 250 kg VS/tons indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation, men dette blev ikke målt direkte. I rapportens bilag er nævnt et VS-indhold i affaldet på 30%, opgjort over en måned, men det fremgår ikke klart, hvorledes dette er fremkommet.

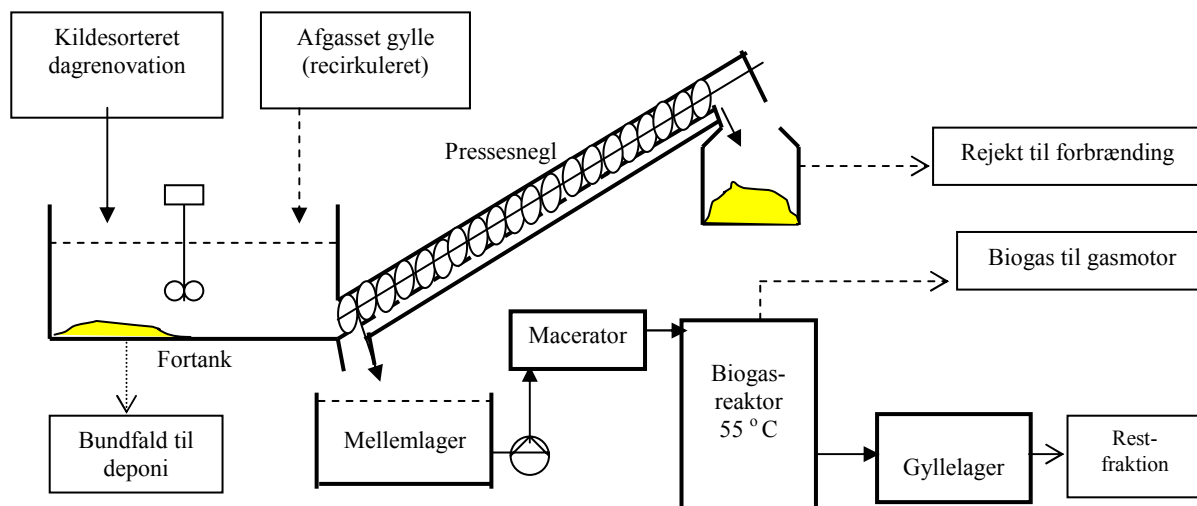
Det kildesorterede organiske dagrenovation er opgjort til omkring 6% af den totale mængde tilført VS til anlægget, men det fremgår ikke tydeligt af (Miljøstyrelsen, 1995), hvorvidt der er tale om skønnede eller målte VS-værdier i beregningerne.

## 6.3 Behandlingsmetode

Affaldet blev bioforgasset termofilt på Vegger Biogasfællesanlæg sammen med gylle, industriaffald, blegejord og afgasset biomasse.

Som det ses på 6.3-1 blev den indsamlede organiske dagrenovation blandet med gylle, industriaffald og blegejord i en omrørt fortank, hvor der skete en neddeling af dagrenovationen samt en bundfældning. Efter 8-17 timer i fortanken blev blandingen kørt gennem en sneglepresse (sigte med roterende snegl), hvorfra den faste fraktion (rejektet) blev ført til container, mens den våde biofraktion via et mellemlager blev ledt videre til biogasreaktoren gennem en macerator. I reaktoren blev det organiske stof bioforgasset ved 55 °C .





Figur 6.3-1: Skitse af forsøgsanlæg til bioforgasning af organisk dagrenovation på Vegger Biogasfællesanlæg

Biogassen blev udnyttet til produktion af elektricitet i en gasmotor, mens restfraktionen blev videreført til landbruget som gødning via anlæggets gyllelager.

#### 6.4 Procesdata

##### Frasortering

Efter opblanding med gylle blev et fast rejekt frasorteret i sneglepressen. Denne fraktion, som sendtes til forbrænding angives i (Miljøstyrelsen, 1995) at have et TS-indhold på kun 15-20%. Der blev i perioden tilført 283 tons dagrenovation, hvoraf 24% blev frasorteret via sneglepressen, svarende til en mængde på 67 tons. Det vurderes i (Miljøstyrelsen, 1995), at rejektet bestod af 5-6% fejlsorteret materiale (plastposer, affaldssække) og af organisk materiale, der ikke var blevet tilstrækkeligt findelt i fortanken.

Tabel 6.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Vegger Biogasanlæg

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons	283	
Antal prøver/læs	Stk.		
Periode	-	07.92-03.93	
TS i kildesorteret dagrenovation	%	25-40	
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS	30	Jf. Bilag til rapport
Forsorteringsmetode	-	Sneglepresse	
Frasorteret ved forsortering	%	24	Plast mm.
TS i forbehandlet dagrenovation	%		
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS		
TS i rejekt	%	15-20	Indeholder gylle
VS i rejekt	% af TS		
Bundfald i blandetank	%		Deponeres
TS i bundfald	%		
Fast restfraktion	%	0	
TS i fast restfraktion	%		

##### Hygiejnisering

Anlægget var ikke forsynet med separat hygiejniseringskøle, men biomassen opholdt sig i rådetanken i ca. 2 timer ved ca. 56°C, hvilket dog ikke er tilstrækkeligt til at biomassen kan betragtes som kontrolleret hygiejniseret efter de gældende regler.

7 sæt prøver fra fortank, blandetank, rådnetank og lagertank for afgasset biomasse blev analyseret for fækale streptokokker, salmonella, listeria og enterococcer. Salmonella og listeria blev ikke påvist i lagertank for afgasset biomasse, mens enterococcer og fækale streptokokker blev reduceret med en faktor over 50.

### Gasproduktion

(Miljøstyrelsen, 1995)'s udregning af biogasproduktionen er delvist baseret på laboratorieforsøg, hvor kildesorteret organisk dagrenovation podet med afgasset biomasse fra anlæggets bioreaktor ved bioforgasning gav et biogasudbytte på 0,7 m<sup>3</sup> biogas/kg VS. Forsøgene er ikke nærmere beskrevet i (Miljøstyrelsen, 1995), men forfatterne af rapporten vurderer, at resultaterne vil svare til resultaterne for et fuldskalaanlæg.

Opholdstiden i anlægget var ca. 16 dage. Det gennemsnitlige biogasudbytte ved den termofile proces blev beregnet til 720 Nm<sup>3</sup>/ton VS på baggrund af daglige gasmålinger over en tidsperiode på en måned. Beregningerne fremgår dog ikke klart af (Miljøstyrelsen, 1995). Den beregnede gasmængde repræsenterer det gennemsnitlige gasudbytte for blandingen af gylle, blegejord, industriaffald og dagrenovation, og da dagrenovationen kun udgør ca. 6% af den samlede biomasse, kan bidraget herfra til den samlede gasproduktion kun opgøres med meget stor usikkerhed.

Gasudbyttet fra det organiske affald skønnes i økonomiafsnittet i (Miljøstyrelsen, 1995) at udgøre 175m<sup>3</sup>/tons tilført kildesorteret organisk dagrenovation, svarende til et indhold på 250 kg VS/tons kildesorteret organisk dagrenovation eller ca. 33% VS i det forbehandlede organiske dagrenovation ved 0,7 Nm<sup>3</sup> biogas/kg VS. Dette høje VS-indhold er ikke dokumenteret i (Miljøstyrelsen, 1995).

Ca. 8% af den samlede gasproduktion blev produceret i lagertanken, hvorfra biogas også blev opsamlet og målt. Metanindholdet i den producerede biogas blev målt til omkring 65%.

Tabel 6.4-2: Bioforgasning, Vegger Biogasanlæg

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	Termofil med gylle	
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>		
Opholdstid	Dage	16	
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlede VS	720	Blanding ink. Gylle, blegejord mm
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesort. dagen.		Udokumenteret skøn på 175 Nm <sup>3</sup> /ton
Metan i biogas	%	65	

### VFA-målinger

Der blev foretaget målinger af VFA-koncentrationen i reaktorerne flere gange ugentligt. Alle disse målinger viste koncentrationer lavere end 1.000 mg/l.

### Restprodukter

Det afgassede organiske materiale blev benyttet som gødning i landbruget.

Der blev ikke fundet rester af plast, glas eller metal i restproduktet.

Der blev ikke analyseret for tungmetaller i forbindelse med undersøgelsen.

I den flydende restfraktion blev målt følgende værdier for næringsstofferne N, P og K:

Tabel 6.4-3: Restprodukter, Vegger Biogasanlæg

	Enhed	Fast restfraktion	Flydende restfraktion
Andel af tilført affald	%		
TS	%		
VS	% af TS		
N-tot	g/kg TS		30
P-tot	g/kg TS		11
K	g/kg TS		195
Cd	mg/kg TS		
Ni	mg/kg TS		
Pb	mg/kg TS		
Hg	mg/kg TS		
DEHP	mg/kg TS		
NPE	mg/kg TS		

## 6.5 Driftserfaringer

Der var en del problemer med driften af anlægget, bl.a. en del lugtproblemer i starten. Disse blev dog løst vha. tætning af reaktor og indsættelse af biologiske filtre.

Et andet væsentligt problem var dannelse af skum i reaktoren. Skumdannelsen havde ingen synlig sammenhæng med ubalance i den biologiske proces. Problemet med skumdannelsen var, at skummet fyldte så meget i reaktoren, at der ikke kunne tilføres tilstrækkelige mængder affald, hvilket medførte uregelmæssig tilførsel og dermed uregelmæssig drift. Problemet med skumdannelse blev løst ved anvendelse af skumdæpningsmiddel.

Tømning af fortanken voldte en del problemer pga. dannelse af flydelag og uhensigtsmæssig placering af udløbet. Dette problem blev delvist løst ved ændring af tankens udløb.

VFA-målingerne viste svingende koncentrationer, hvilket sandsynligvis skyldes den uregelmæssige indfødsning af affald.

Der var problemer med at renholde riste i anlægget.

## 6.6 Konklusion

Vegger Biogasanlæg er et normalt biogasfællesanlæg til behandling af gylle, industriaffald, blegejord mm. Ved forsøget blev en mindre mængde kildesorteret dagrenovation behandlet med gylle, blegejord og industriaffald i et separat pilotanlæg.

24% af den kildesorterede organiske dagrenovation blev frasorteret. Der foreligger ikke målinger af dagrenovationens bidrag til frasorteringen fra anlæggets blandetank.

Der foreligger ikke målinger af gasudbyttet fra dagrenovationen alene.

(Miljøstyrelsen, 1995) indholder ikke detaljerede oplysninger om massebalance og sammensætning af de enkelte fraktioner igennem biogasprocessen. Det er derfor svært at vurdere bidragene fra de enkelte affaldstyper til det målte biogasudbytte.

Der blev dagligt målt totalt biogasudbytte, hvilket derfor kan regnes som en relativt veldokumenteret værdi. Der foreligger dog kun pålidelige målinger fra en kort periode (1 måned).

Da dagrenovationen kun udgjorde 6% af den samlede biomasse kan bidraget herfra kun beregnes med meget stor usikkerhed, således at (Miljøstyrelsen, 1995) skøn af gasudbyttet på 175 Nm<sup>3</sup>/tons kildesorteret organisk dagrenovation må betragtes som usikkert.

Det blev ikke foretaget analyser af tungmetaller eller miljøfarlige organiske stoffer i tilknytning til forsøget.



# 7 Nordsjællands Biogasanlæg I/S

## 7.1 Indledning

Nordsjællands Biogasanlæg I/S ejes af Helsingør og Fredensborg-Humblebæk kommuner. Anlægget blev opført i 1991 til behandling af kildesorteret organisk dagrenovation fra de Nordsjællandske kommuner ved mesofil udrådning sammen med mindre mængder organisk industriaffald. Biogasanlægget blev detailprojekteret af Carl Bro A/S med en kapacitet på 20.000 tons affald/år. Den benyttede proces var udviklet af BTA.

Driften var fra starten præget af indkøringsvanskeligheder, og i 1994 blev indgået en forpagtningsaftale med Carl Bro Miljø A/S, som samtidig foretog mindre ændringer i anlægget. I 1996 blev anlægget lukket på grund af tekniske og miljømæssige problemer.

Der er foretaget flere vurderinger af driften af det nu lukkede anlæg. Den efterfølgende beskrivelse af erfaringer fra biogasanlægget er baseret på nedenstående referencer. Den første reference opsummerer driftsforholdene på anlægget i perioden 1. november 1995 til 31. marts 1996, hvor anlægget kørte uden større driftsforstyrrelser. Den anden reference indeholder bl.a. en sammenfatning af analyseresultater af restprodukterne fra biogasanlægget.

”Nordsjællands Biogasanlæg I/S, Uvildig undersøgelse af fremtidsperspektiverne for Nordsjællands Biogasanlæg”. Jes la Cour Jansen, Maj 1996

”Nordsjællands Biogasanlæg I/S, Sammenlignende miljøvurdering af tre forskellige affaldsbehandlingsstrategier for bionedbrydeligt, organisk affald og restaffald fra de seks samarbejdende kommuner i Nordsjællands Biogasanlæg I/S og Nordforbrænding”. Jes la Cour Jansen, Marts 1997.

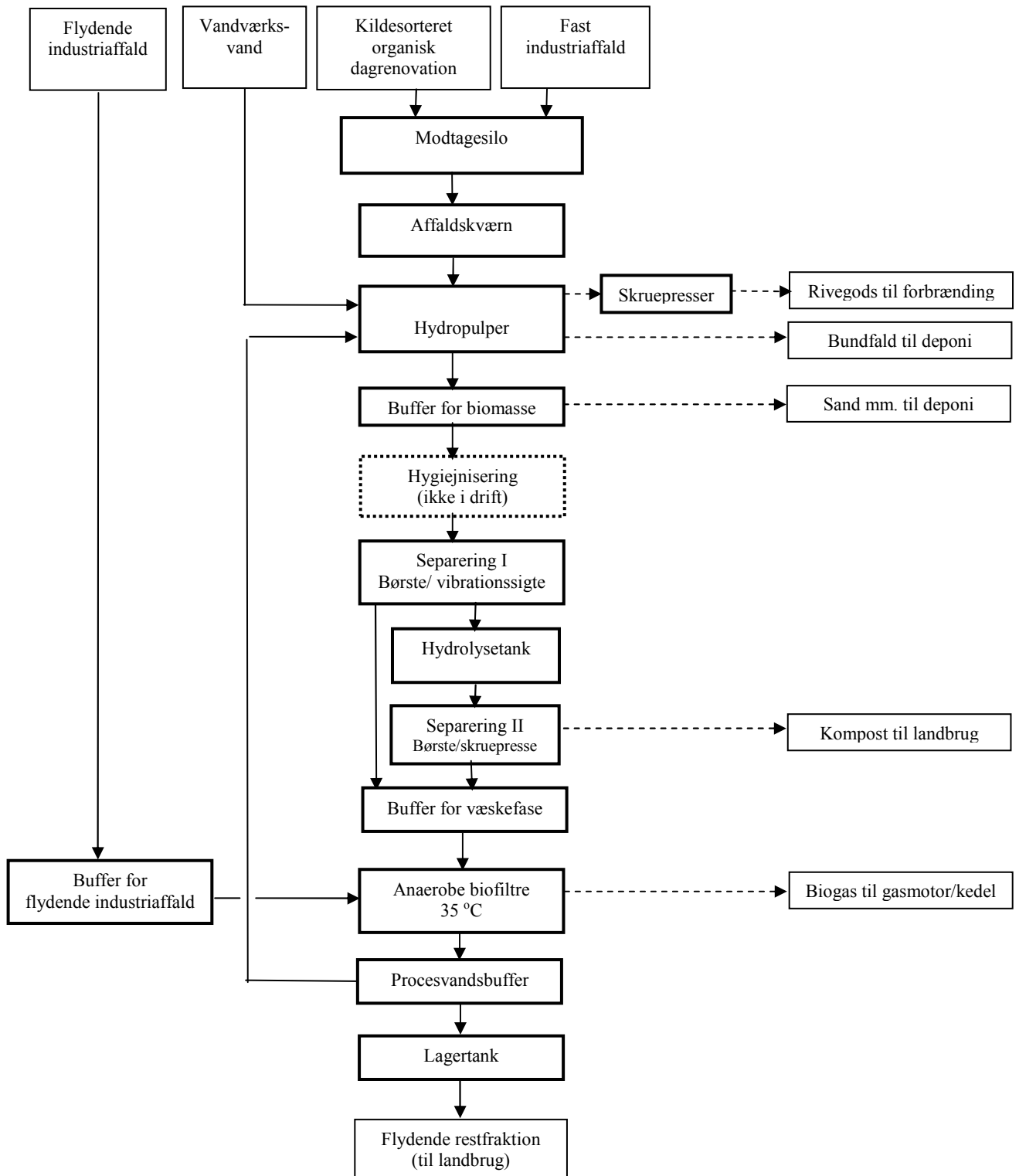
## 7.2 Indsamlet affald

I den undersøgte periode fra 1. november 1995 til 31. marts 1996 blev i alt behandlet 6.100 tons blandet affald, heraf ca. 86% dagrenovation (5.275 tons). Resten af affaldet bestod af fast og vådt industriaffald. Ifølge (la Cour Jansen, 1996) havde den samlede mængde affald et gennemsnitlig tørstofindhold på ca. 35% TS, mens dagrenovationen havde et tørstofindhold på ca. 30% TS. Disse værdier er beregnet ud fra det angivne vandindhold i de opstillede massebalancer i (la Cour Jansen, 1996), da der ikke blev målt TS på det tilførte affald. Massebalancerne er opstillet på baggrund af målinger på anlægget i forsøgsperioden.

Det blev registreret, hvor mange læs der blev modtaget på dags- og ugebasis i perioden. I gennemsnit blev modtaget 102 læs kildesorteret organisk dagrenovation per uge á 2,4 tons per læs.

### 7.3 Behandlingsmetode

Dagrenovationen blev behandlet mesofilt i to parallelt drevne biofiltre sammen med det tilførte industriaffald. På figur 7.3-1 er opstillet et principflowdiagram for biogasanlægget, som det var indrettet i maj 1996.



Figur 7.3-1: Principflowdiagram af Nordsjællands Biogasanlæg i 1996.

Den kildesorterede organiske dagrenovation og det faste industriaffald blev aflæsset i en indendørs silo, og herfra med grab ført til en affaldskværn, hvor poserne blev lukket op. Herfra blev det neddelte affald tilført en hydropulper, hvori affaldet - efter tilsætning af afgasset procesvand - blev separeret i en flydende biomasse (pulp), en slusegodsfraktion (bundfald) og en rivegodsfraktion (plast mm.).

Rivegodsfraktionen blev presset i 3 skru presseser og kørt til forbrænding eller deponi. Slusegodset blev afvandet i en container og kørt til deponi. Pulpen blev tilført en buffertank, hvor der lejlighedsvis blev udtaget sandholdigt bundslam, som efter afvanding i container blev kørt på deponi.

Pulpen blev derefter bypasset det oprindeligt installerede hygiejniseringsanlæg, og pumpet til separering i en børstesigte og en vibrationsigte (oprindeligt en centrifuge). Væskefasen blev ført til 2 anaerobe biofiltre, mens slamfasen blev behandlet i 2 hydrolysetanke, hvor en del af det suspenderede organiske stof blev opløst under mesofile forhold (35°C).

Den hydrolyserede slamfase blev derefter separeret i en børstesigte og en skru presse - i en kompostfraktion, som blev kørt på landbrugsjord eller deponering - og en væskefase, som blev tilført de anaerobe biofiltre.

Efter udrådning i biofiltrene ved ca. 35°C, blev væskefasen via en procesvandsbuffertank ført til en lagertank, hvorfra den flydende restfraktion lejlighedsvis blev kørt på landbrugsjord.

Det modtagne flydende industriaffald blev via buffertanke pumpet direkte til de anaerobe biofiltre.

#### 7.4 Procesdata

##### Frasortering

Den første frasortering foregik i pulperne, idet bortkørt rivegods og slusegods i perioden udgjorde ca. 25% af vægten af den tilførte kildesorterede organiske dagrenovation, beregnet på baggrund af tal fra de opstillede massebalancer. Rivegodset blev før bortkørsel afvandet til et TS-indhold på 50-55% TS.

Tabel 7.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Nordsjællands Biogasanlæg

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons	5.275	+468 t fast og 357 t vådt industriaffald
Antal prøver/læs	Stk.	2.200 læs	
Periode	-	1/11/95 - 31/3/96	
TS i kildesorteret dagrenovation	%	30	Fra massebalancer - Ikke målt.
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS		ikke oplyst
Forsorteringsmetode	-	Kværn og pulpning	Rivegods+slusegods fra pulper
Frasorteret ved forsortering	%	25	+2,5% bundfald fra buffertank for pulp
TS i forbehandlet dagrenovation	%		
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS		
TS i rejekt	%	50-55	Målt i rivegods efter afvanding i presser
VS i rejekt	% af TS		
Bundfald i buffertank for pulp	%	2,5	
TS i bundfald	%	15	
Fast restfraktion	%		
TS i fast restfraktion	%		



## Hygiejnisering

Biogasanlæggets hygiejniseringsanlæg, hvor biomassen kunne hygiejniseres ved 70°C i en time, var ikke i drift i den undersøgte periode. Det skyldtes tekniske problemer med tilstopninger i pumper og varmevekslere med sand og tekstilfibre.

Da rådneprocessen foregik ved ca. 35°C, var restprodukterne underlagt anvendelsesrestriktioner, således at de ikke måtte anvendes på fortærbare afgrøder eller havebrug og skulle nedbringes inden 12 timer efter udsprejning.

## Gasproduktion

Der blev udtaget biogas fra både buffertanke, hydrolysetanke, anaerobe biofiltre og lagertanken for den flydende restfraktion. Biogasudbyttet blev målt kontinuert vha. flowmålere, der registrerede den samlede gasproduktion for hele anlægget. Det totale gasudbytte for den mesofile proces (dagrenovation + industriaffald) var i perioden 111 Nm<sup>3</sup>/ton affald med gennemsnitlig 70% CH<sub>4</sub>, mens den for hele 1995 blev målt til omkring 92 Nm<sup>3</sup>/tons affald pga. flere driftsuheld.

I (la Cour Jansen, 1996) er for den betragtede periode beregnet et gasudbytte for dagrenovationen alene på 97 Nm<sup>3</sup>/ton modtaget kildesorteret organisk dagrenovation med 65% CH<sub>4</sub>. Dette tal er fundet ved at fratække det teoretiske gasudbytte fra industriaffaldet og herefter fordele den resterende gasproduktion på det tilførte affald.

Volumen af de anaerobe filtre var 2×800 m<sup>3</sup>.

Overflødig gas eller gas af for dårlig kvalitet blev afbrændt. Dette udgjorde ca. 5% af den totale mængde producerede gas.

(la Cour Jansen, 1996) indeholder ikke oplysninger om glødetab (VS). Kun vådvægt og TS-indhold vurderes. Gasproduktionen kan derfor ikke opgives pr tons VS.

Tabel 7.4-2: Bioforgasning, Nordsjællands Biogasanlæg

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	Mesofil 35° C, BTA-proces	Med industriaffald
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	2×800	Anaerobe biofiltre
Opholdstid	Dage		
Tilført vand	m <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagrenovation	0,61	Målt
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton total tilført dagrenovation	111	Målt
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagrenovation	97	Beregnet
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS		
Metan i biogas	%	65	

## VFA-målinger

Der blev i perioden målt fede syrer i de anaerobe biofiltre stigende fra ca. 1.500 til ca. 15.000 mg/l, hvilket overstiger niveauet for et velfungerende anlæg.

## Restprodukter

Der produceredes i den betragtede periode 1.140 tons kompostfraktion med et TS-indhold på 36-40%, som benyttedes til jordbrugsformål, dog ikke til ”fortærbare afgrøder”.

Der produceredes i perioden 5.658 tons flydende restfraktion med TS-indhold på 2-5%. Denne fraktion benyttedes ligeledes som gødning i landbruget med samme restriktioner.

Restprodukterne voldte i perioder problemer, pga. manglende afgang og for højt indhold af fede syrer. Dette medførte, ud over kraftige lugtgener, ætsninger af afgrøderne.

I tabel 7.4-3 er angivet variationen af indhold af TS, tungmetaller samt total-P i de foreliggende 4-5 analyser af restprodukterne fra biogasanlægget fra perioden primo 1995 til april 1996.

Tabel 7.4-3: Restprodukter, Nordsjællands Biogasanlæg

	Enhed	Fast restfraktion	Flydende restfraktion	Bemærkning
Andel af tilført affald	%	19,5	93	> 100% pga. vandtilførsel til processen
TS	%	36-40	2-5	Målte værdier
N-tot	kg/ton	6,8	1,9	Middel 1993-1996
P-tot	g/kg TS	0,5-2,2		
K	g/kg TS			
Cd	mg/kg TS	0,08-0,5	0,7-1,3	
Ni	mg/kg TS	3-7	7,6-14	
Pb	mg/kg TS	3-22	4-20	
Hg	mg/kg TS	0,04-1,0	0,1-0,3	
Cd	mg/kg P	44-617	63-228	
Ni	mg/kg P	1800-6200	1200-3400	
Pb	mg/kg P	3200-27200	1200-4000	
Hg	mg/kg P	28-1200	21-61	
DEHP	mg/kg TS	50	61	
NPE	mg/kg TS	2,4	5,3	

For cadmium er niveauet så højt at de gældende grænseværdier ikke er overholdt og for DEHP er den gældende afskæringsværdi på 50 mg/l ikke overholdt for den flydende restfraktion.

#### Andet

Nordsjællands Biogasanlæg havde et stort vandforbrug på ca. 0,61 m<sup>3</sup>/ton kildesorteret organisk dagrenovation, som indgik i den flydende restfraktion.

#### 7.5 Driftserfaringer

Lugtgener fra anlægget medførte hyppige klager fra naboerne og førte i 1996 til anlæggets lukning.

Anlægget var gennem hele sin levetid plaget af tekniske problemer der førte til hyppige driftsstop.

#### 7.6 Konklusion

Nordsjællands biogasanlæg var Danmarks første egentlige biogasanlæg til behandling af kildesorteret dagrenovation. I undersøgelsesperioden var anlægget i normal drift. Hovedparten af affaldet bestod af kildesorteret organisk dagrenovation; men der blev også tilført mindre mængder fast og flydende industriaffald. Anlægget blev lukket i 1996.

25% af det tilførte affald blev frasorteret i forsoreringen og 2,5% blev frasorteret som bundfald fra buffertank for pulp.

Over en 5 måneders periode uden alvorlige driftsforstyrrelser blev gasproduktionen bestemt til 97 Nm<sup>3</sup> biogas med metanindhold 65% for den modtagne kildesorterede dagrenovation. Mængden er beregnet ud fra den samlede gasproduktion fratrukket teoretisk beregnede bidrag fra flydende og fast industriaffald.

Rapporterne tillader ikke en opstilling af massebalancer for forsøget, der direkte kan benyttes til at verificere gasudbyttet; men forsøgsomfang og omfang af måleprogrammets sandsynliggør det angivne resultatet. Da dagrenovationen ydermere udgjorde den dominerende affaldsmængde og det modtagne industriaffald var relativt veldefineret kan den angivne gasmængde derfor betragtes som relativt sikker.

Den flydende restfraktion overholdt ikke de i dag gældende grænseværdier for cadmiumindholdet og indholdet af DEHP i den flydende restfraktion overskred den i dag gældende afskæringsværdi.

# 8 Vaarst-Fjellerad (Miljøprojekt 443)

## 8.1 Indledning

Biogasfællesanlægget i Vaarst-Fjellerad blev opført af de tilknyttede leverandører af kvæg- og svinegyde i 1998. Biogasanlægget blev etableret med en ekstra rådnestank til separat behandling af ca. 10 tons kildesorteret organisk dagrenovation per døgn.

I perioden marts - september 1998 blev her gennemført et forsøg med behandling af kildesorteret organisk dagrenovation fra Nordsjælland for at afklare de procesmæssige forhold ved separat udrådning af forbehandlet organisk dagrenovation under termofile forhold, samt afklare om den afgassede biomasse kunne overholde de nye kravværdier for tungmetaller og miljøfremmede stoffer gældende fra juli 2000.

Nedenstående gennemgang af anlæggets drift er beskrevet ud fra følgende reference:

”Undersøgelse af cadmium, DEHP og NPE i kildesorteret, forbehandlet og afgasset dagrenovation”, Miljøprojekt nr. 443, 1998

## 8.2 Indsamlet affald

I perioden 11/3-10/9-1998 blev indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation i 6 nordsjællandske kommuner, som blev forbehandlet på forsoringsanlægget på Knudmoseværket i Herning, som er beskrevet i kapitel 4.

Herfra blev i forsøgsperioden tilført 550 tons forbehandlet organisk dagrenovation til biogasanlægget i Vaarst-Fjellerad. Den gennemsnitlige tilførsel udgjorde ca. 3 tons/døgn.

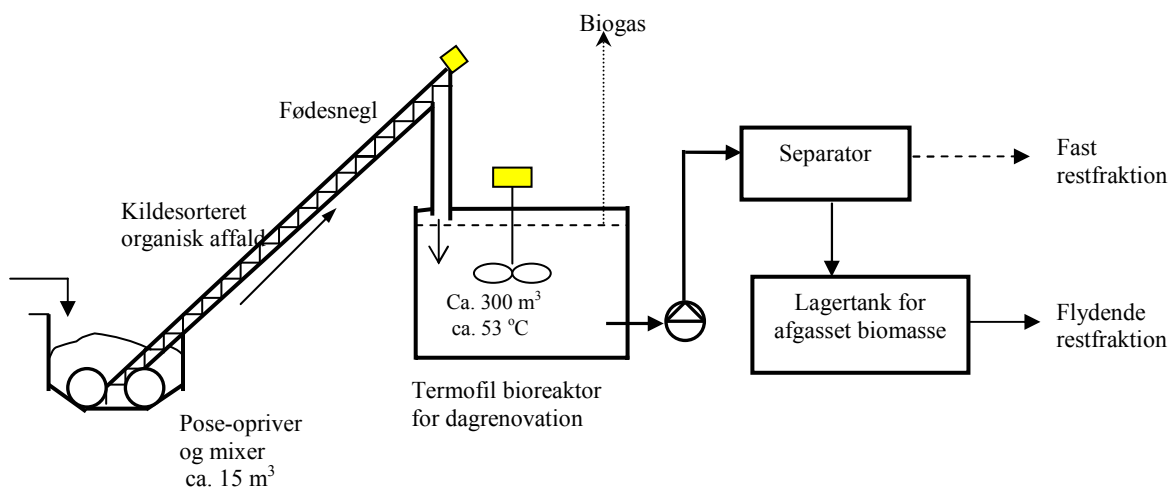
Det gennemsnitlige TS-indholdet i det forbehandlede affald er målt til 30% med 84,6% VS. I tabel 8.2-1 er gengivet de gennemsnitlige analyseresultater af 6 prøver i forsøgsperioden.

Tabel 8.2-1: Forbehandlet organisk dagrenovation, Vaarst-Fjellerad

	Enhed	Kildesorteret organisk dagrenovation	Bemærkning
TS	%	30	
VS	% af TS	84,6	
N-tot	% af TS	2,1	
NH4	% af TS	0,19	
P-tot	% af TS	0,37	
K	% af TS	0,79	
Cd	mg/kg TS	0,23	
Cd	mg/kg P	62	
DEHP	mg/kg TS	28	
NPE	mg/kg TS	1,1	

### 8.3 Behandlingsmetode

På figur 8.3-1 er skitseret et principdiagram for behandlingen af det forbehandlede organiske dagrenovation på Biogasanlægget i Vaarst-Fjellerad. Forsorteringen på Knudmoseanlægget er tidligere beskrevet i kapitel 4.



Figur 8.3-1: Skitse af anlægget til dagrenovation på Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg

Den forbehandlede organiske dagrenovation blev aflæsset i en mixer med parallelle snegle og blev herfra med en lukket snegl ført til en termofil, omrørt bioreaktor, hvor der ved forsøgets start var påfyldt ca. 200 m<sup>3</sup> podegylle. I april 1998 blev yderligere tilført 170 m<sup>3</sup> podegylle og i slutningen af forsøget blev tilsat ca. 50 tons vand til mixeren.

Fra bioreaktoren blev den afgassede biomasse pumpet til en separator, der separerede biomassen i en flydende restfraktion, som blev tilført anlæggets lagertank for afgasset biomasse – og en fast restfraktion, som blev kørt til forbrænding. Derudover blev et flydelag af plast lejlighedsvis fjernet fra bioreaktoren med en grab.

### 8.4 Procesdata

#### Frasortering

Forsorteringen foregik på Knudmoseværket, i en neddeler og en rullsigte. I det aktuelle forsøg blev fundet en frasorteringsprocent på omkring 40%, da der var en meget stor fejlsorteringsprocent i affaldet fra Nordsjælland.

Der blev frasepareret ca. 50 tons plastholdig fast restfraktion efter rådnetanken.

Samlet blev således frasorteret ca. 50% af den indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation. Derudover blev efter forsøget fjernet bundfald og flydelag fra bioreaktoren.

Der er i (Miljøstyrelsen, 1998) opstillet en massebalance, som ikke er afstemt hverken mht. vand eller tørstof.

Tabel 8.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Vaarst-Fjellerød

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons	ca. 915	Til forsøringsanlæg
Antal prøver/læs	Stk.		
Periode	-	11/3-98-10/9-98	
TS i kildesorteret dagrenovation	%		Ikke målt
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS		Ikke målt
Forsøringsmetode	-	Neddeling + rullsigte	På Knudmoseværket
Frasorteret ved forsøring	%	40	
TS i forbehandlet dagrenovation	%	30	
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS	86	
TS i rejekt	%		Ikke målt
VS i rejekt	% af TS		Ikke målt
Bundfald i blandetank	%		
TS i bundfald	%		
Fast restfraktion	%	ca. 10	
TS i fast restfraktion	%	25-46	

### Hygiejniserings

Der indgik ikke målinger af hygiejniske parametre i forsøget. Forsøgsanlægget var ikke forsynet med et separat hygiejniseringsstrin; men biomassen har haft en opholdstid på ca. 100 døgn i bioreaktoren ved omkring 53°C, og der har således formentlig været en rimelig hygiejniserings under forsøget.

### Gasproduktion

Måling af de producerede gasmængder skete kontinuert gennem hele forsøget, mens gassens sammensætning (herunder indholdet af metan) blev målt minimum to gange ugentligt. Metanindholdet i gassen blev målt til gennemsnitlig 64% CH<sub>4</sub>.

Gasmålerne var ude af drift i en del af forsøgsperioden. Biogasudbyttet blev derfor angivet for de perioder, hvor målingerne ansås for pålidelige. Biogasudbyttet blev beregnet til 155 Nm<sup>3</sup>/ton forbehandlet organisk dagrenovation - med 64% CH<sub>4</sub>. Dette svarer til 93 Nm<sup>3</sup>/ton kildesorteret organisk dagrenovation ved en frasorteringsprocent på 40% ved forsøringen.

Biogasudbyttet fra affaldet er beregnet ud fra et målt totalt udbytte fra blandingen i reaktoren, men hvordan denne korrektion er foregået, fremgår ikke af (Miljøstyrelsen, 1998). Da det forhandlede organiske dagrenovation indeholdt ca. 25,4% VS, fås et teoretisk biogasudbytte på ca. 610 Nm<sup>3</sup>/ton VS.

I forsøgsperioden tilførtes tanken kun organisk dagrenovation, men både ved forsøgets start (og igen efter problemer i opstarten) blev der podet med gylle. Biogasreaktoren indeholdt derfor en faldende mængde gylle hen igennem forsøget (fra ca. 80% i starten mod 10% i slutningen).

Tabel 8.4-2: Bioforgasning, Vaarst-Fjellerød

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	termofil (53 °C)	Opstart med gylle
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	300	
Opholdstid	dage	ca. 100	
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagren.	93	155 ved forbehandlet affald
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS	610	Beregnet
Metan i biogas	%	64	

### VFA-målinger

Der blev gennem forsøget jævnlige målt VFA-koncentrationer i reaktoren. Koncentrationerne af VFA har svinget meget (4.000-20.000 mg/l). I (Miljøstyrelsen, 1998)

vurderes dette at skyldes en dårlig temperatur regulering i starten af perioden samt den uregelmæssige belastning af bioreaktoren.

### Restprodukter

I Tabel er gengivet variationen af analyseresultaterne af 9 prøver af den flydende restfraktion og 4 prøver af den faste restfraktion.

Tabel 8.4-3: Restprodukter, Vaarst-Fjellerad

	Enhed	Fast restfraktion	Flydende restfraktion
Andel af tilført affald	%	ca. 10	
TS	%	25-46	2,4-7,2
VS	% af TS	69,5	29-80
N-tot	g/kg våd	4,1-8,7	4,0-6,7
Ammonium	g/kg våd	0,2-3,2	2,5-3,9
P-tot	g/kg våd	1,0-3,4	0,3-0,6
K	g/kg våd	1,3-2,9	1,7-3,5
Cd	mg/kg TS	0,08-0,63	0,41-0,84
Cd	mg/kg P	16-80	47-134
DEHP	mg/kg TS	37-270	49-480
NPE	mg/kg TS	0,3-9,7	<0,6-30

Indholdet af cadmium i den flydende restfraktion var på niveau med de gældende krav – både i forhold til fosforindholdet og i forhold til prøvens indhold af TS, idet 2 ud af 9 prøver overskred begge grænseværdier.

Indholdet af DEHP i den flydende restfraktion oversteg den gældende afskæringsværdi markant og indholdet af NPE var lejlighedsvis over afskæringsværdien.

### 8.5 Driftserfaringer

Der var i forbindelse med opstart og drift af anlægget en del problemer bl.a. med regulering af temperaturen, hvilket resulterede i at anlægget måtte genpodes med gylle i april 1998. Mange af problemerne var knyttet til omrøringen og til ophobning af plast i flydelaget.

Der var ligeledes problemer med at tilføre de nødvendige mængder affald til anlægget, således, at en stabil produktion kunne sikres.

### 8.6 Konklusion

På Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg findes en separat behandlingslinie, der har indgået i flere forsøg med behandling af kildesorteret organisk dagrenovation.

I forsøget blev den forbehandlet kildesorterede dagrenovation direkte ført til biogasreaktoren, idet forsøringen foregik på Knudmoseværket i Herning. Her blev frasorteret 40% af affaldet og i Vaarst-Fjellerad blev yderligere 10% af affaldet frasorteret efter udrådning. Derudover resterede der en del affald, herunder bundslam i biogasreaktoren efter forsøget.

Gasudbyttet fra dagrenovation angives i (Miljøstyrelsen, 1998) til 155 Nm<sup>3</sup>/ton (64% metan) for den forbehandlede organisk dagrenovation, svarende til 93 Nm<sup>3</sup>/ton kildesorteret dagrenovation.

Forsøgsrapporterne tillader ikke en opstilling af massebalancer for forsøget, der direkte kan benyttes til at verificere gasudbyttet.

Det angives i (Miljøstyrelsen, 1998), at der er stor usikkerhed på målingen af det totale gasudbytte, bl.a. pga. at gasmålerne i perioder var defekte. Ved beregningerne er der benyttet resultater fra en kortere periode, hvor anlægget og gasmålingen fungerede tilfredsstillende. Gasproduktionen er således ikke baseret på den samlede undersøgelsesperiode. Gasproduktionen er korrigeret for bidrag fra den tilstedeværende mængde gylle i anlægget, som ikke udgjorde en konstant andel under forsøget, hvilket medfører en øget usikkerhed.

Forsøget er gennemført med en meget lang opholdstid i bioreaktoren på ca. 100 døgn, og den gennemsnitlige belastning af bioreaktoren var således meget lille.

Cadmiumindholdet i den flydende restfraktion lå meget tæt på de nuværende grænseværdier og afskæringsværdien for DEHP var væsentligt overskredet under stort set hele forsøget. Afskæringsværdien for NPE var lejlighedsvis overskredet.





# 9 Vaarst-Fjellerad (Aalborg, DeWasterforsøg), Sommeren 1999

## 9.1 Indledning

I dette og det følgende kapitel 10 beskrives et forsøg udført for at vurdere effektiviteten af en nyudviklet DeWaster til forsortering og forbehandling af kildesorteret organisk dagrenovation, således at yderligere frasortering var unødvendig. Forsøget udførtes i 2 dele på Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, som beskrevet i kapitel 8.

Den første del af forsøget (14/6-6/9-1999) fokuserede på de tekniske forhold ved drift af den nyudviklede DeWaster samt måling af biogasmængder - produceret af organisk dagrenovation efter forbehandling i DeWasteren. Den anden del af forsøget er beskrevet i kapitel 10. Nedenstående beskrivelse af første del af forsøget er baseret på følgende reference:

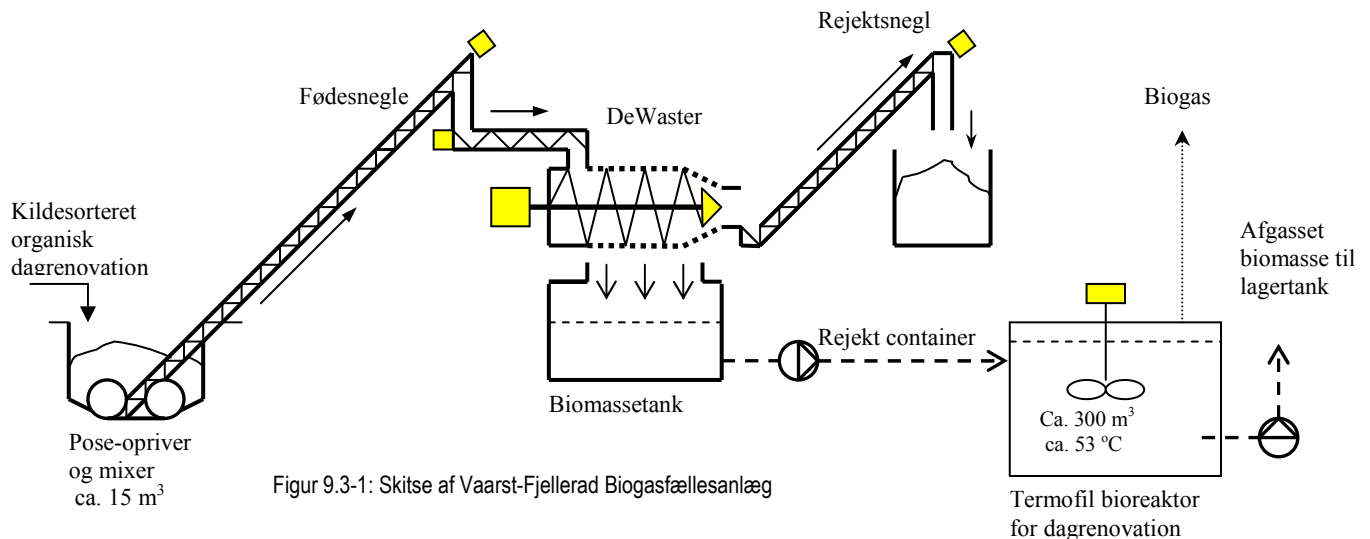
”Vurdering af DeWaster til forsortering af kildesorteret organisk husholdningsaffald”, Aalborg Kommune, Rambøll, Maj 2000.

## 9.2 Indsamlet affald

Der blev i sommeren 1999 behandlet 42,5 tons kildesorteret organisk dagrenovation. Affaldet blev indsamlet fra ca. 2.600 husstande i Aalborg kommune.

## 9.3 Behandlingsmetode

Det kildesorterede organiske dagrenovation blev behandlet i en separat linie på anlægget og blev først efter afgangning blandet sammen med den afgassede gylle fra det øvrige biogasanlæg. Princippet i anlægget er skitseret på figur 9.3-1.



Den kildesorterede organiske dagrenovation blev aflæsset i den eksisterende mixer på anlægget, hvor poserne blev revet op med to modsatgående snegle. Efter ca. 2 timers mixing blev biomassen som en grød sneget op i DeWasteren, som består af en konisk sneglepresse, hvor biofraktionen presses ud igennem smalle spalter, mens plastposer, papirposer og andre større emner presses ud for enden af DeWasteren,

Den udpresede biomasse blev pumpet til den eksisterende bioreaktor for dagrenovation, mens det udpresede rejekt via en container blev kørt til forbrænding.

Efter afgasning blev biomassen pumpet direkte til anlæggets lagertank for afgasset biomasse og blev derfra tilført landbrugsjord som gødning.

#### 9.4 Procesdata

##### Frasortering

Hele frasorteringen foregik ved hjælp af DeWasteren, således at affaldet blev delt i rejekt (11,35 tons, svarende til 27%) og en flydende organisk fraktion.

Rejektet indeholdt en del organisk stof, men TS-indhold i rejektet er ikke angivet i (Rambøll, 2000).

Tabel 9.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, DeWasterforsøg sommer 1999

	Enhed	Bemærkning
Mængde	Tons	42,5
Antal prøver/læs	Stk.	
Periode	-	14/6/99-6/9/99
TS i kildesorteret dagrenovation	%	
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS	
Frasorteringsmetode	-	DeWaster
Frasorteret ved frasortering	%	27
TS i forbehandlet dagrenovation	%	ca. 19
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS	
TS i rejekt	%	
VS i rejekt	% af TS	
Bundfald i blandetank	%	
TS i bundfald	%	
Fast restfraktion	%	0
TS i fast restfraktion	%	

##### Hygiejnisering

Der indgik ikke målinger af hygiejniske parametre i forsøget. Forsøgsanlægget var ikke forsynet med et separat hygiejniseringstrin. Biomassen har dog haft en opholdstid på ca. 600 døgn i bioreaktoren ved omkring 53°C, hvorved der formentligt er opnået en betydelig hygiejnisering under forsøget.

##### Gasproduktion

Opholdstiden i reaktoren var omkring 600 dage, hvilket er 40 gange så længe som "normalt". Pga. dette og andre uregelmæssigheder (bl.a. ustabile gasmålere), er den angivne, målte gasproduktion på omkring 300 Nm<sup>3</sup>/ton tilført affald behæftet med meget stor usikkerhed.

Tabel 9.4-2: Bioforgasning, Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, DeWasterforsøg sommer 1999

	Enhed	Bemærkning
Biogas proces	-	termofil
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	300
Opholdstid	Dage	600
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagren.	
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS	300 Meget usikker måling
Metan i biogas	%	69-74

### VFA-målinger

Måling af fede syrer i biogasreaktoren viste koncentrationer mellem 500 og 1.500 mg/l.

### Restprodukter

Den afgassede biomasse blev ikke separeret, men kunne pumpes direkte til lagertank for afgasset biomasse og derfra afsættes til landbruget.

Der er ikke angivet oplysninger om TS- og VS-indhold i restprodukterne, ligesom der ikke blev målt for tungmetaller og miljøfremmede stoffer.

## 9.5 Driftserfaringer

Et af de væsentligste problemer var for ringe tilførsel af organisk dagrenovation til anlægget, hvilket har medført en uregelmæssig drift og en meget lang opholdstid.

Der var problemer med at afpasse indfødsningen fra sneglen til DeWasteren, ligesom selve pressehuset ofte blev tilstoppet af bl.a. metaldåser. Disse problemer er efterfølgende delvist løst.

Den opstillede prototype af DeWasteren krævede en del manuel betjening og næsten konstant opsyn under driften.

Den typiske kapacitet af DeWasteren udgjorde ca. 1-1½ tons/time og maksimalt 2 tons/time.

## 9.6 Konklusion

På Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg findes en separat behandlingslinie, der har indgået i flere forsøg med behandling af kildesorteret organisk dagrenovation.

I forsøget blev kildesorterede dagrenovation forbehandlet i en DeWaster hvor 27% af det indkommende affald frasorteres. Der skete ikke nogen frasortering efter bioforgasning.

Gasudbyttet fra dagrenovationen angives i (Rambøll, 2000) til 300 Nm<sup>3</sup>/ton for det forbehandlet organisk dagrenovation, svarende til ca. 220 Nm<sup>3</sup>/ton kildesorteret dagrenovation.

Forsøgsrapporterne tillader ikke en opstilling af massebalancer for forsøget, der direkte kan benyttes til at verificere gasudbyttet.

Det angives i (Rambøll, 2000), at der er stor usikkerhed på gasmålingen, bl.a. pga. at gasmålerne i perioder var defekte. Ved beregningerne er benyttet resultater fra en kortere periode, hvor anlægget og gasmålingen fungerede tilfredsstillende.

Gasproduktionen er således ikke baseret på den samlede undersøgelsesperiode og må på det foreliggende grundlag anses for meget usikker.

Forsøget er gennemført med en meget lang opholdstid i bioreaktoren og den gennemsnitlige belastning af bioreaktoren er således meget mindre end normalt.

Der indgik ikke måling af tungmetaller og miljøfarlige organiske stoffer i forsøget.

# 10 Vaarst-Fjellerad (Aalborg, DeWasterforsøg), Januar 2000

## 10.1 Indledning

I nærværende kapitel beskrives anden del af DeWasterforsøget. Dette forsøg fokuserede på sortering af affaldet i DeWasteren (forbehandlingen). Det var formålet at vurdere DeWasterens evne til at frasortere fejlsorteringer og uønskede stoffer og levere en egnet råvare til videre behandling i biogasanlæg med en kvalitet, der muliggjorde udbringning af den afgassede biomasse på landbrugsjord.

Denne del af forsøget, som primært fokuserede på miljømæssige forhold blev foreløbigt afrapporteret i udkast af 17. marts 2000 til Miljøprojekt med titlen:

”Forsortering af organisk affald til biogas med DeWaster.- Forfattere: PlanEnergi, Jes la Cour Jansen, Jysk Biogas International og Aalborg Kommune”.

Ved efterfølgende beskrivelse af anden del af forsøget er ud over ovennævnte reference benyttet:

”Vurdering af DeWaster til forsortering af kildesorteret organisk husholdningsaffald”, Aalborg Kommune, Maj 2000.

## 10.2 Indsamlet affald

I dette forsøg indgik 4 vognlæs kildesorteret organisk dagrenovation fra Aalborg kommune, hvilket i alt udgør 18 tons. To læs var fra etageejendomme med et mindre bidrag fra GASA (Grønttorv) og to læs fra enfamiliehusene. Forsøget kørte i perioden 11/01-2000 til 27/1-2000.

Tabel 10.2-1: Tilført kildesorteret affald, Vaarst-Fjellerad Biogastælesanlæg, DeWasterforsøg Januar 2000

	Enhed	Kildesorteret organisk dagrenovation	Bemærkning
Mængde per læs	tons	3,2-6,5	
Fejlsorteringer	%	4,8	Metal, plast og kartoner
TS	%	28,1-35,1	
VS	% af TS	80,1-87,7	
Kvælstof	kg/tons tilført dagrenovation	7	
Fosfor	kg/tons tilført dagrenovation	0,7	
Cd	mg/kg TS	0,04-0,14	
Cd	mg/kg P	18-61	
Ni	mg/kg TS	1,5-4,0	
Ni	mg/kg P	670-1.700	
DEHP	mg/kg TS	29-48	
NPE	mg/kg TS	4,8-9,5	

Affaldet blev karakteriseret med henblik på kontrol af om slambekendtgørelsens krav kunne overholdes i det forbehandlede affald idet slambekendtgørelsens krav skal overholdes inden udrådning, hvis der sammenblandes flere affaldstyper som

det typisk vil være tilfældet på biogasfællesanlæg. Derudover skulle vurderes om frasorteringen i DeWasteren førte til et reduceret indhold af problemstoffer i forhold til det rå affald. I tabel 10.2-1 er gengivet analyseresultaterne fra de 4 læs

### 10.3 Behandlingsmetode

Det kildesorterede organiske dagrenovation blev behandlet i en separat linie på anlægget og blev først efter afgangning blandet sammen med den afgassede gylle. Anlæggets opbygning og funktion er beskrevet i kapitel 8.

### 10.4 Procesdata

#### Frasortering

I DeWasteren blev frasorteret mellem 29 og 50% i de forskellige læs (de forskellige fraktioner blev vejjet). Som i forsøget sommeren 1999 blev en del organisk stof frasorteret i DeWasteren. I dette forsøg udgjorde det organiske indhold i rejektet 55%-74% af indholdet i det kildesorterede organiske dagrenovation (beregnet på baggrund af VS-målinger). Denne rest blev ført til forbrænding.

Tabel 10.4-1: Tilførte mængder og frasortering, Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, DeWasterforsøg Januar 2000

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons	18	
Antal prøver/læs	Stk.	4	Vognlæs
Periode	-	11/1/00-27/1/00	
TS i kildesorteret dagrenovation	%	32	
VS i kildesorteret dagrenovation	% af TS	84	
Forsorteringsmetode	-	DeWaster	
Frasortering	%	40	(29-50)
TS i forbehandlet dagrenovation	%	18,5	
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS	84	
TS i rejekt	%	48	Rejektet indeholdt 55-75% af VS i dagren.
VS i rejekt	% af TS	86	
N-tot i rejekt	g/kg TS	28	Målt i forbehandlet dagrenovation
P-tot	g/kg TS	3,9	Målt i forbehandlet dagrenovation
K	g/kg TS	-	
Cd	mg/kg TS	0,13	Målt i forbehandlet dagrenovation
Ni	mg/kg TS	4,9	Målt i forbehandlet dagrenovation
Pb	mg/kg TS		
Hg	mg/kg TS		
DEHP	mg/kg TS	145	Målt i forbehandlet dagrenovation
NPE	mg/kg TS	8	Målt i forbehandlet dagrenovation
Bundfaldsmængde	%		
TS i bundfald	%		

#### Hygiejnisering

Hygiejnisering indgik ikke i forsøget.

Tabel 10.4-2: Forbehandlet organisk dagrenovation (Biomasse), Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, DeWasterforsøg Januar 2000

	Enhed	Forbehandlet organisk HHA	Bemærkning
TS	%	16,0-18,5	
VS	% af TS	79,0-85,9	
Kvælstof	kg N/tons våd biomasse	5,7-5,6	
Fosfor	kg N/tons våd biomasse	0,68-0,87	
Cd	mg/kg TS	0,093-0,21	
Cd	mg/kg P	25-47	
Ni	mg/kg TS	3,3-7,8	
Ni	mg/kg P	880-1.800	
DEHP	mg/kg TS	27-70	
NPE	mg/kg TS	6,6-11,0	

### Gasproduktion

Der blev ikke målt produktion af biogas i dette forsøg. I vurderingen af det teoretiske gasudbytte og det teoretiske indhold af metan blev begge størrelser beregnet på baggrund af indholdet af COD i den forhandlede organiske dagrenovation samt en skønnet nedbrydningsgrad på 80%.

Ifølge beregningerne er det muligt at producere 91-106 Nm<sup>3</sup> biogas (65% CH<sub>4</sub>) per tons forbehandlet organisk dagrenovation ved en forudsat omsætning af 80% af det organiske indhold.

Sammenholdt med de øvrige resultater gav dette et beregnet gasudbytte på ca. 645 Nm<sup>3</sup> biogas(65% CH<sub>4</sub>) /tons VS i det forhandlede organiske dagrenovation.

Tabel 10.4-3: Bioforgasning, Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg, DeWasterforsøg Januar 2000

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-		termofil
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	300	
Opholdstid	Dage		
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton kildesorteret dagrenovation	100	Beregning baseret på COD analyser
Biogas mængde	Nm <sup>3</sup> /ton forbehandlet VS	645	Beregning baseret på COD analyser
Metan i biogas	%	65	skøn

### VFA-målinger

Der indgik ikke måling af fede syrer i projektet.

### Restprodukter

Måling af restprodukter udover rejektet (se ovenfor) indgik ikke i forsøget.

## 10.5 Driftserfaringer

DeWasteren var stadig under udvikling i forsøgsperioden, således at det er uklart om den store frasortering i forhold til det tidligere forsøg er et resultat af udviklingsstadiet for DeWasteren eller af affaldets kvalitet.

## 10.6 Konklusion

På Vaarst-Fjellerad Biogasfællesanlæg findes en separat behandlingslinie, der har indgået i flere forsøg med behandling af kildesorteret organisk dagrenovation.



I forsøget blev kildesorterede dagrenovation forbehandlet i en DeWaster og i gennemsnit 40% af det indkommende affald blev frasortert. Der skete ikke nogen yderligere frasortering efter bioforgasning.

Måling af gasudbyttet indgik ikke i forsøget; men på baggrund af det målte indhold af COD i det forhandlede affald kan gasudbyttet beregnes til ca. 100 Nm<sup>3</sup> biogas (65% CH<sub>4</sub>) per tons forbehandlet organisk dagrenovation ved en forudsat omsætning af 80% af det organiske indhold i affaldet og med en frasortering som den gennemsnitligt målte.

Målinger af det forhandlede affalds kvalitet i relation til slambekendtgørelsens krav viste at der for en enkelt prøve blev fundet overskridelse af afskæringsværdien for DEHP, medens der for alle øvrige parametre var god margen til bekendtgørelsens kravværdier og afskæringsværdier.

# 11 Danske laboratorieforsøg

Der er tilsyneladende afrapporteret meget få danske laboratorieforsøg om bioforgasning af organisk dagrenovation. Disse er beskrevet i det følgende.

## 11.1 Lars Rohold, DTU 1995

”Optimering af biogasanlæg”

Eksamensprojekt 1995, Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet

Som led i et eksamensprojekt i 1995 udførtes der laboratorieforsøg for at undersøge biogaspotentialer for kildesorteret dagrenovation. Forsøgene udførtes som batch udrådninger med organisk dagrenovation samt udrådnet affald fra Nordsjællands Biogasanlæg (NBA).

Batchforsøgene blev foretaget i 50 ml hætteglas (i alt 57 ml totalt) startende med 2 ml podemateriale, som bestod af lige dele af afgasset kvæggylle og granulært slam fra anaerobe filtre på NBA. I batchforsøgene blev der tilsat forskellige mængder affald, hhv. 0,1 ml, 0,5 ml, 1,0 ml, 1,5 ml og 2,0 ml, som blev udtaget i buffertanken (dvs. efter der er tilsat vand til affaldet). Lignende forsøg blev udført med afgasset materiale udtaget fra anaerobe filtre på NBA. Udrådningen skete ved ca. 37 °C.

Affaldet blev analyseret for TS, VS og COD<sub>total</sub>.

Tabel 11.1-1: Tilførte mængder og frasortering, Rohold, 1995

	Enhed		Bemærkning
Mængde	Tons		
Antal prøver	Stk.	24	
Forsorterings-metode	-	Affaldskvæm og pulpning	
TS i forbehandlet dagrenovation	%	5,1	fra buffertank
VS i forbehandlet dagrenovation	% af TS	78	
COD <sub>total</sub>	kg/m <sup>3</sup>	73,2	COD/VS = 1,8 kg/kg

Metanproduktionen blev fulgt dagligt i den første uge, derefter med et par dages mellemrum. Ved hver analyse blev udtaget 0,4 ml gas vha. sprøjte, som blev analyseret på gaschromatograf.

Resultaterne fra forsøgene viste en metanproduktion på 550 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton VS svarende til 300 m<sup>3</sup>/ton COD. Denne værdi er ca. 10 % under den teoretisk beregnede ifølge Buswell's formel. Resultaterne for den afgassede biomasse viste et potentiale for metanproduktion på 780 m<sup>3</sup>/ton VS svarende til 250 m<sup>3</sup>/ton COD. Kontrolforsøgene kun indeholdende podemateriale viste næsten ingen biogasproduktion, hvorfor dette sandsynligvis er afgasset inden forsøgets start.

Tabel 11.1-2: Bioforgasning, Rohold, 1995

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	Mesofil, 37°C	batch
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	57 ml	
Opholdstid	Dage	16	
Metan mængde	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS (blanding)	550	
Metan mængde	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton dagrenovation	22	ved 5,1% TS
Metan i biogas	%	57	

## 11.2 H. Hartmann, DTU 2001

”Anaerob nedbrydning af organisk husholdningsaffald sammen med gylle. Del 1”

H. Hartmann, I. Angelidaki og B.K. Ahring  
Biocentrum-DTU, Januar 2001

I disse forsøg blev der målt biogaspotentialer for organisk dagrenovation nedbrudt sammen med gylle i både batch- og reaktorforsøg.

Karakterisering af det indkomne affald skete hovedsageligt vha. måling af miljøfremmede stoffer (NPE, LAS og DEHP). NPE og LAS blev fundet at være uden betydning i forhold til de gældende afskæringsværdier, mens koncentrationen af DEHP i det indkomne affald udgjorde det halve af afskæringsværdien. Dette ville medføre, at koncentrationen af stoffet i effluenter ville overstige afskæringsværdien (pga. TS-reduktion i anlægget), hvis der ikke skete tilsvarende anaerob fjernelse af DEHP i anlægget, hvilket ikke så ud til at være tilfældet. Derimod skete en begrænset fjernelse af PAH-forbindelser.

Der blev udført biogaspotentialmålinger på affald fra Grindsted Rensningsanlæg. Disse forsøg blev udført som batchforsøg, hvor der som batchreaktorer blev benyttet 100 ml vials. Forsøgene løb over minimum 30 døgn ved 55°C og den dannede metanmængde blev målt vha. gaskromatografi. I forsøgene blev målt biogaspotentialer, metanmængde og VS-reduktion. Der blev målt på forskellige blandingsforhold mellem gylle og organisk dagrenovation. Ved forholdet 1:1 blev fundet et gaspotentiale på omkring 350 l CH<sub>4</sub>/kg VS, mens tilførsel af rent organisk dagrenovation fortyndet med vand medførte en biogasproduktion på omkring 400 l CH<sub>4</sub>/kg VS. Der sås generelt et faldende biogaspotentiale med et faldende indhold af affald i reaktorerne.

Tabel 11.2-1: Bioforgasning, batch, Hartmann, 2001

	Enhed		Bemærkning
Biogas proces	-	Termofil, 55°C	Batch dagrenovation + gylle
Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>	100 ml	
Opholdstid	Dage	Min. 30	
Metan mængde	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS (blanding)	350-400	50-100% dagrenovation
Metan mængde	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> dagrenovation	187	
Metan i biogas	%		

Reaktorforsøgene blev ligeledes udført med forskellige blandingsforhold mellem gylle og biomasse. Der blev startet op med ren gylle som podemateriale og derefter tilsat en blanding af gylle og dagrenovation, hvor

indholdet af dagrenovation steg trinvist gennem forsøget. I slutningen af forsøget blev således tilsat hhv. 50 og 100% organisk dagrenovation (fortyndet til 6% TS med vand) til de to reaktorer. Nedbrydningsprocesserne var stabile, også ved højt indhold af organisk dagrenovation. Dette blev bl.a. bestemt ved løbende at måle koncentrationen af fede syrer i reaktorerne. Reaktorforsøgene viste biogaspotentialer for det organiske dagrenovation der svarede til resultaterne fra de udførte batchforsøg (350 l CH<sub>4</sub>/kg VS ved 50% tilsat organisk dagrenovation og omkring 400 l CH<sub>4</sub>/kg VS ved 100% tilsat organisk dagrenovation).

Tabel 11.2-2: Bioforgasning reaktor, Hartmann, 2001

	Enhed	Bemærkning	
Biogas proces	-	Termofil 55°C	Reaktor, gylle + dagrenovation
Reaktorvolumen	Liter	3	
Opholdstid	Dage		
Metan mængde	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton VS (blanding)	350-400	50-100% dagrenovation
Metan mængde	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton affald		
Metan i biogas	%		



# 12 Sammenfatning

Gennemgangen af de rapporterede danske data om bioforgasning af organisk dagrenovation har vist, at der ikke eksisterer undersøgelser med behandling af organisk affald i teknisk eller fuld skala, der er planlagt og gennemført således at de fremkomne data kan bruges til en sikker bestemmelse af det opnåede gasudbytte fra organisk dagrenovation. Der er kun rapporteret driftsdata fra tre anlæg i normal drift, medens de øvrige rapporter vedrører korterevarende undersøgelser enten i forsøgsanlæg eller i eksisterende biogasfællesanlæg, der har været drevet med dagrenovation i en kortere periode.

Mange undersøgelser har været gennemført med henblik på teknikudvikling eller afprøvning af samlede løsninger til håndtering og bioforgasning af affaldet. I flere tilfælde har måling af gasudbyttet ikke været inddraget som en central del af forsøgene. Driften har i mange tilfælde været præget af tekniske eller driftsmæssige problemer, således at de opnåede gasudbytter kun har kunnet bestemmes med stor usikkerhed. Det er også karakteristisk, at der ofte rapporteres store problemer med måling af gasmængden.

I undersøgelserne er der anvendt kildesorteret dagrenovation fra mange forskellige indsamlingsordninger. Der har været betydelige forskelle i indsamlingsvejledninger og kvalitet af det indsamlede materiale ligesom der er anvendt flere forskellige typer forsortering af affaldet inden bioforgasningen. Disse forskelle er ofte mangelfuldt beskrevet således at det ikke er muligt at knytte de opnåede resultater entydigt sammen med kriterierne i affaldsindsamlingen og effekten af forsorteringsanlægget.

I alle tilfælde (på nær ét kortvarigt forsøg) er dagrenovationen behandlet sammen med andet organisk materiale, typisk gylle i forbindelse med bioforgasningen. Der er dog også rapporteret resultater fra sambehandling med kommunalt spildevandsslam og organisk industriaffald.

De beregnede biogasudbytter for dagrenovationen er i de fleste tilfælde fundet på basis af det samlede målte gasudbytte, fratrukket et teoretisk beregnet bidrag fra det øvrige organiske materiale. I nogle få tilfælde har den organiske dagrenovation udgjort hovedparten af det behandlede organiske materiale; men i de fleste tilfælde har det kun udgjort en mindre andel således at bidraget til gasudbyttet fra dagrenovationen er bestemt med stor usikkerhed. I en række tilfælde er gasudbyttet ikke målt; men har kunnet beregnes teoretisk ud fra affaldets indhold af organisk stof målt som COD eller VS.

Det har ikke været muligt at finde undersøgelser, hvor det tilknyttede måle- og analyseprogram har været så omfattende, at der kan opstilles massebalancer for omsætning af det organiske materiale til verifikation af de målte gasudbytter for dagrenovationen.

De fundne gasudbytter for organisk dagrenovation må derfor anses for meget usikkert bestemt på baggrund af de rapporterede resultater.

I de fleste undersøgelser er affaldet forbehandlet inden bioforgasningen og forsøg netop med forsorteringen og med dens konsekvenser for bioforgasningen har været hovedformålet med flere af de tilgængelige undersøgelser. I praksis har det vist sig

at forsoreringen har medført frasortering lige fra nogle få % af affaldet til at frasorteringen udgjorde mere end 50% af det indsamlede affald. Frasorteringen har været bestemt af indsamlingsordning, kvaliteten af husstandenes kildesortering og den anvendte forsøringsudrustning. Det kan på baggrund af undersøgelserne ikke fastslås hvilke typer forsorering, der er mest hensigtsmæssig eller hvilken sammenhæng der er mellem det kildesorterede affalds kvalitet og valg af forbehandlingsudstyr.

På baggrund af de foreliggende undersøgelser, med hovedvægten på de undersøgelser, hvor der foreligger det bedste datamateriale til belysning af biogasproduktionen fra organisk dagrenovation, kan det skønnes, at biogasproduktionen typisk ligger i området 110-180 Nm<sup>3</sup>/ton affald efter forsorering med et metanindhold på ca. 65%. Omregning af gasudbytte til det indsamlede kildesorterede affald viser, at der i de fleste tilfælde sker en betydelig frasortering således at gasudbyttet baseret på det indsamlede kildesorterede organiske dagrenovation typisk er på 100-120 Nm<sup>3</sup>/ton indsamlet affald. Der findes dog indsamlingsordninger, hvor frasorteringen er meget lille (f.eks. i Grindsted), således at gasudbyttet baseret på det indsamlede affald stort set svarer til udbyttet efter forsorering.

Restprodukterne fra bioforgasning af organisk dagrenovation er blandet med det rester fra det øvrige organiske affald, der har indgået i behandlingen. Ved forsøg på biogafællesanlæg er restprodukterne som regel sammenblandet med andet afgasset materiale og udbragt i jordbruget. Ved sambehandling med gylle frasepareres typisk en fast restfraktion, der oftest køres til forbrænding, medens den flydende restfraktion anvendes i jordbruget. Ved sambehandling med slam er det omvendt. Her tilføres den flydende restfraktion renseanlæggets vandbehandlingstrin, medens slammet anvendes i jordbruget.

Kvalitetsbedømmelsen af restprodukterne fra bioforgasning af organisk dagrenovation vanskeliggøres af, at reglerne for jordbrugsanvendelse er ændret meget i de seneste 10 år. Kravene til indholdet af tungmetaller er skærpet betydeligt i perioden ligesom der er stillet krav til indholdet af en række organiske miljøfremmede stoffer. Derudover er reglerne for, hvor prøver til kontrol med overholdelsen af kravene skal tages, ændret. I dag sker kontrollen med overholdelse af Slambekendtgørelsens krav i alt væsentlighed som kontrol af indholdet inden bioforgasning og ikke direkte med de restprodukter, der anvendes i jordbruget.

Ovennævnte forhold betyder, at det ikke er muligt at bedømme, om restprodukterne fra de tidlige undersøgelser ville kunne overholde dagens krav. Der er dog en generel tendens til, at det hovedsageligt er affaldets indhold af det plastblødgørende DEHP, der kan give alvorlige problemer med overholdelse af slambekendtgørelsens krav.

## 13 Referencer

- Bro, Bjarne, 2001, Grindsted Kommune, ”Motivation for establishing a wastetreatmentplant”, Foredragsnotat fra Spildevandskonference i Hvidovre, 2001
- Hartmann, H. et al, 2001, ”Anaerob nedbrydning af organisk husholdningsaffald sammen med gylle, Del 1”, Hinrich Hartmann, Irini Angelidaki og Birgitte K. Ahring, Biocentrum-DTU, Januar 2001
- Herning Kommunale Værker, 1991, ”Forsøgsprogram vedrørende anvendelse af kildesorteret husholdningsaffald i Biogasfællesanlæg”, Herning Kommunale Værker, 1991
- Jysk Biogas, 1998-90, ”For/efterbehandling af kildesorteret organisk husholdningsaffald til biogasproduktion 1989-90”
- la Cour Jansen, 1996: Nordsjællands Biogasanlæg I/S, Uvildig undersøgelse af fremtidsperspektiverne for Nordsjællands Biogasanlæg, maj 1996
- la Cour Jansen, 1997: Nordsjællands biogasanlæg I/S, sammenlignende miljøvurderinger af tre forskellige affaldsbehandlingsstrategier for bionedbrydeligt, organisk restaffald fra de seks samarbejdende kommuner i Nordsjællands Biogasanlæg I/S og I/S Nordsjælland, marts 1997
- Miljøstyrelsen, 1993, Arbejdsrapport Nr. 61, 1993: ”Behandling af kildesorteret husholdningsaffald på Sinding Biogasfællesanlæg” Herning Kommunale Værker, 1993
- Miljøstyrelsen, 1995: Arbejdsrapport nr. 8, 1995: Behandling af kildesorteret husholdningsaffald på Vegger Biogasanlæg, Jysk Biogas A/S
- Miljøstyrelsen, 1997: Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr.85, 1997, Genanvendelse af dagrenovation – miljømæssig og økonomisk vurdering, Kathe Tønning, Lars Mørck Ottesen og Bjørn Malmgren-Hansen (DTI Miljø), Claus Petersen og Mette Skovgaard (Econet), Hovedrapport
- Miljøstyrelsen, 1997: Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr.86, 1997, Genanvendelse af dagrenovation – miljømæssig og økonomisk vurdering, Kathe Tønning, Lars Mørck Ottesen og Bjørn Malmgren-Hansen (DTI Miljø), Claus Petersen og Mette Skovgaard (Econet), Bilagsrapport
- Miljøstyrelsen, 1998: Miljøprojekt nr. 443, Undersøgelse af cadmium, DEHP og NPE i kildesorteret, forbehandlet og afgasset dagrenovation, Henrik B. Møller, NIRAS
- Miljøstyrelsen, 1999: Miljøprojekt 386: Indsamling og anvendelse af organisk dagrenovation i biogasanlæg, Miljø, teknik og økonomi: Statusrapport
- Miljøstyrelsen, 1999: Miljøprojekt nr. 500, Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i biogasreaktorer, Pia Mai og Gert Jungersen (Teknologisk Institut), Lars Elsgaard og Finn P. Vinter (Danmarks Jordbrugsforskning), Jens Tørslev (Forskningscenter Foulum)



Miljøstyrelsen 2000a: Miljøstyrelsens statusredegørelse om genanvendelse af organisk dagrenovation og slam, Februar 2000

Miljøstyrelsen 2000b, Udkast til Miljøprojekt, ”Forsortering af organisk affald til biogas med dewaster”, Plan Energi, Jes la Cour Jansen, Jysk Biogas International & Aalborg Kommune, Miljøstyrelsen, MEM, 2000

Miljø & energiministeriet, 2000: Bekendtgørelse nr. 49 af 20-1-2000, Bekendtgørelse om anvendelse af affaldsprodukter til jordbrugsformål

Møller, Henrik B., 1991, ”Forsøgsprogram vedrørende anvendelse af kildesorteret husholdningsaffald i biogafællesanlæg”, Herning Kommunale Værker, 1991

Møller, Henrik B. & Sørensen, Per L., 1995, ”Fuldskalaanlæg til behandling af kildesorteret husholdningsaffald på Sinding-Ørre”, Herning Kommunale Værker, Januar 1995

Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S, 1998: Energistyrelsen – Ålborg kommune, Forbehandling af kildesorteret organisk husholdningsaffald til biogasanlæg, Forsøgsprojekt udarbejdet i samarbejde med PTK ENVITEC, August 1998

Rambøll, 2000: Aalborg Kommune, Vurdering af Dewaster til forsortering af kildesorteret organisk husholdningsaffald, maj 2000

Ren viden, nr. 4, 1998, Et enestående biogasanlæg

Rohold, Lars, 1995, ”Optimering af biogasanlæg”, Eksamensprojekt udført på Nordsjællands Biogasanlæg, Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet, 1995

Ørtenblad, Henrik, 1998, Herning Kommunale Værker, ”Bioforgasning: eksempel”, artikel i ”Affaldsteknologi”, Thomas H. Christensen (red.), Teknisk Forlag, 1998

Ørtenblad, Henrik, 2001, Personlig kommunikation med Henrik Ørtenblad, Herning Kommunale Værker, vedrørende driftserfaringer på Studsgård Biogasanlæg, samt kvalitet af tilført affald. April 2001.”

# Bilag 3

## Beregning af biogaspotentiale og brændværdi

Trine Lund Hansen, Janus T. Kirkeby & Irimi Angelidaki, Miljø &  
Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby

Tore Hulgaard, Rambøll, Virum



# Indholdsfortegnelse

<b>INDHOLDSFORTEGNELSE</b>	<b>3</b>
<b>1 BIOFORGASNING OG FORBRÆNDING</b>	<b>5</b>
1.1 BIOFORGASNING	5
1.2 FORBRÆNDING	5
<b>2 BIOGASPOTENTIALE</b>	<b>7</b>
2.1 BEREGNING PÅ BASIS AF DEN KEMISKE SAMMENSÆTNING	7
2.1.1 <i>Beregning på basis af grundstofsammensætningen</i>	7
2.1.2 <i>Beregning på basis af komponentsammensætningen</i>	8
2.2 BEREGNING PÅ BASIS AF KEMISKE SAMLEPARAMETRE	9
2.2.1 <i>Beregning på basis af COD</i>	9
2.2.2 <i>Beregning på basis af Volatile Solids (VS)</i>	10
2.3 REALISEREDE BIOGASPOTENTIALER	11
2.3.1 <i>Måling af biogaspotentiale</i>	11
2.3.2 <i>Realiserede biogaspotentialer for organiske komponenter</i>	12
2.3.3 <i>Sammenligning af målte og beregnede biogasværdier</i>	13
2.4 KOMPONENTERNE I BIOGAS	13
2.5 BIOGASPOTENTIALE I FORHOLD TIL AFFALD	16
<b>3 BRÆNDVÆRDI</b>	<b>17</b>
3.1 DEFINITION AF BRÆNDVÆRDI	17
3.1.1 <i>Øvre og nedre brændværdi</i>	17
3.1.2 <i>Måling af brændværdi</i>	17
3.2 BEREGNING PÅ BASIS AF KEMISKE OPLYSNINGER	17
3.2.1 <i>Beregning på basis af grundstofsammensætning</i>	17
3.3 BEREGNEDE OG MÅLTE BRÆNDVÆRDIER	18
3.4 BRÆNDVÆRDI I FORHOLD TIL AFFALD	19
<b>4 REFERENCER</b>	<b>20</b>



# 1 Bioforgasning og forbrænding

Denne note opsummerer kort forskellige tilgangsvinkler til beregning af biogaspotentiale og brændværdi for organisk dagrenovation ud fra kemiske data.

## 1.1 Bioforgasning

Bioforgasning kan anvendes til behandling af organisk affald fra både industri, landbrug og husholdninger. Ved bioforgasning dannes metan, som i Danmark typisk anvendes til produktion af elektricitet og varme. Restprodukterne fra processen kan anvendes som gødning i landbruget forudsat at det er frit for miljøfremmede stoffer, tungmetaller og lignende.

Bioforgasning er anaerob mikrobiel omdannelse af organisk stof under dannelse af  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  og vand. Første skridt i processen er hydrolysen, hvor de fermentative bakterier nedbryder kulhydrater, fedt og proteiner til mindre enheder. Disse optages efterfølgende i bakterierne, hvor de under fermentering omdannes til acetat, andre kortkædede fede syrer, alkoholer, hydrogen og  $\text{CO}_2$ . Disse produkter nedbrydes derefter til  $\text{CH}_4$  og  $\text{CO}_2$  /Angelidaki, 2002/.

Substratet er afgørende for processens forløb. Svært nedbrydeligt organisk stof kan hæmme eller forhindre processen og medføre at der kun sker delvis nedbrydning af substratet. Let nedbrydeligt substrat kan ligeledes hæmme processen. Dette skyldes, at der kan ske en ophobning af fede syrer, hvis hydrolysen foregår hurtigere end selve forgasningsprocessen. Dette kan medføre en sænkning af pH, hvilket kan hæmme processen /Angelidaki, 2002/.

Ved bioforgasning af organisk affald er der tale om et meget sammensat og varierende substrat. Kendes den kemiske sammensætning af substratet, kan det teoretiske biogaspotentiale beregnes for den enkelte prøve. Dette potentiale vil sjældent opnås i et fuldskala biogasanlæg, da der her opereres med begrænset opholdstid (typisk omkring 14 dage). Nedbrydningsgraden af substratet kan angives som den opnåede gasproduktion sammenholdt med det teoretiske gaspotentiale eller som den procentvise reduktion af organisk stof (VS) under processen.

Den producerede biogas kan brændes af i en gasmotor med kombineret el og varmeproduktion eller elproduktion alene. Som alternativ kan biogassen renses for  $\text{CO}_2$  og kan derefter anvendes som naturgas i evt. busser.

## 1.2 Forbrænding

Affaldsforbrænding benyttes til behandling af mange typer affald. Ved forbrændingen reduceres affaldets vægt og volumen betydeligt samtidig med at affaldets energiindhold kan udnyttes til produktion af elektricitet og fjernvarme. Forbrændingsanlæggene har de senere år optimeret energivirkningsgraderne på anlæggene samtidig med at driften ofte er gået fra

varmeproduktion til kombineret kraftvarmeproduktion.  
Energivirkningsgraderne nærmer sig 90 % af den indfyrede energimængde i affaldet (nedre brændværdi) ved konventionel kraftvarmeproduktion.

Forbrænding af affald er kendetegnet ved, at der er et overskud af ilt tilstede i forbrændingskammeret og der tilføres derfor store mængder luft til processen. Affaldet føres til forbrændingskammeret, hvor det tørrer, pyrolyserer og forgasser, de dannede gasser brænder og koksresten brænder ud. Forbrændingen sker typisk ved temperaturer mellem 1000 og 1200 °C. Røggassen føres til et efterforbrændingskammer, hvor temperaturen holdes i intervallet 850 og 950 °C for at sikre udbrænding af røggassen. Den varme røggas føres til en kedel, hvor energien overføres til vand/vanddamp, som cirkulerer i et lukket kredsløb. I kredsløbet anvendes denne vanddamp til elektricitets- og fjernvarmeproduktion.

## 2 Biogaspotentiale

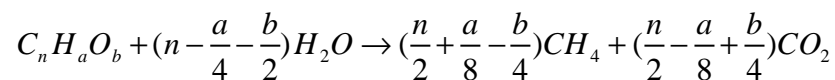
Biogaspotentialet kan kvantificeres på flere forskellige måder, som redegjort for i dette afsnit. Det er hensigten at redegøre for en række metoder, hvor forholdsvis simple laboratoriemålinger på affaldet skal kunne anvendes til beregning af det teoretiske biogaspotentiale. Dette skal efterfølgende anvendes til at opnå kvalificerede forudsigelser af biogasproduktionen i større anlæg. Metoderne tager udgangspunkt i måling af henholdsvis grundstofsammensætningen, komponent sammensætningen, COD og VS. Dertil kommer måling af biogaspotentiale i en laboratoriereaktor.

### 2.1 Teoretisk biogaspotentiale beregnet på basis af den kemiske sammensætning

Den kemiske sammensætning af det organiske stof, der udgør substratet for biogasprocessen, har afgørende betydning for udbyttet af metan.

#### 2.1.1 Beregning på basis af grundstofsammensætningen

Kendes grundstofsammensætningen af substratet mht. kulstof, hydrogen og ilt, kan det teoretiske gasudbytte beregnes vha. Buswell's formel:



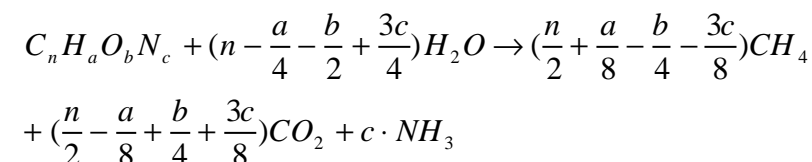
/Angelidaki, 2002/

Metanmængden udtrykt på basis af VS beregnes således ud fra følgende formel:

$$B_{O,th} = \frac{22,4 \cdot (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4})}{12 \cdot n + a + 16 \cdot b} \quad \frac{Nl CH_4}{g VS}$$

/Angelidaki, 2002/, hvor N står for standardbetingelser (0°C og 1 atm. tryk).

Indeholder prøven kvælstof, er det nødvendigt at benytte en udvidet udgave af Buswell's formel, der tager hensyn til kvælstoffets bidrag til redoxprocesserne:



$$B_{O,th} = \frac{22,4 \cdot (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8})}{12n + a + 16b + 14c} \quad \frac{Nl CH_4}{g VS}$$



/Angelidaki, 2002/

Det antages her, at kvælstoffet forbliver på sin reducerede form (omdannes til  $\text{NH}_3$ ). Indeholder prøven også svovl, skal der ligeledes korrigeres for dette, da det også indgår i redoxprocesserne. Indholdet af svovl i affaldsprøverne har dog vist sig at være relativt lavt (<0,5%), så det er valgt at se bort fra dette.

### Eksempel 1

Affald indsamlet i Hovedstadsområdet, fælles skraldespande, forbehandlet med skrueseparator i Aalborg den 21/5-2001. Affaldets sammensætning (alle procenter er af TS):

52% C = 0,043 mol C/g TS  
7,9% H = 0,079 mol H/g TS  
27,7 % O = 0,017 mol O/g TS  
3,1% N = 0,0022 mol N/g TS

Beregnet: VS%-(C+H+N+S)

Heraf følger, at C:H:O:N = 4,3: 7,9: 1,7: 0,22 på TS-basis. Forholdet mellem grundstofferne på VS-basis vil være det samme. Ud fra den udvidede Buswell formel beregnes metanpotentialet til 0,653 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g VS, svarende til 653 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS

### 2.1.2 Beregning på basis af komponentsammensætningen

Det teoretiske biogaspotentiale kan også beregnes ud fra substratets sammensætning af forskellige organiske fraktioner, såsom kulhydrater (sukker, stivelse, cellulose, træstof osv.), fedt og protein. Disse betegnelser dækker over grupper af organiske stoffer og der findes ikke én kemisk formel for den enkelte gruppe. For at forsimple beregningerne for sammensatte prøver (f.eks. prøver af organisk affald), er det derfor nødvendigt at vælge en gennemsnitsformel for hver fraktion. For kulhydrat vælges sammensatte glukosemolekyler,  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ . Fedt repræsenteres ved  $\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$  og proteiner ved  $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$  /Angelidaki, 2002/. Udfra dette beregnes det teoretiske biogaspotentiale vha. Buswell's formel, se Tabel 1. Ved beregning af det teoretiske biogaspotentiale for protein benyttes en modificeret udgave af Buswell's formel for at tage højde for kvælstofindholdet (se afsnit 2.1.1).

Tabel 1: Beregning af teoretisk biogaspotentiale for forskellige organiske komponenter vha. Buswell's formel. For fedt og protein er beregnet et generelt teoretisk biogaspotentiale samt eksempler på teoretiske biogaspotentiale for specifikke fedt- og proteinprøver.

Komponent	Kemisk formel	Teoretisk biogaspotentiale [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tons VS]
<b>Kulhydrat</b>	<b><math>(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n</math></b>	<b>415</b>
Sukker (glukose)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	373
Stivelse	$\text{C}_5\text{H}_5\text{O}(\text{OH})_2\text{OCH}_2\text{OH}$	415
Cellulose	$\text{C}_5\text{H}_5\text{O}(\text{OH})_2\text{OCH}_2\text{OH}$	415
Træstof	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{OH})_2\text{OCH}_2\text{OH}$	415
<b>Fedt</b>	<b><math>\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6</math></b>	<b>1014</b>
Fedt 1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	952
Fedt 2	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	1041
<b>Protein</b>	<b><math>\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2</math></b>	<b>496</b>
Protein 1	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2$	574
Protein 2	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_3\text{O}_2$	438
Protein 3	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_3$	293

Som det ses, er der store forskelle i biogaspotentialerne på VS-basis for de forskellige organiske komponenter. Fedt har langt højere biogaspotential pr. gram VS end de øvrige komponenter. Indenfor grupperne er der størst variation mellem forskellige former for protein. Der vil derfor også her være den største usikkerhed ved gennemsnitsberegninger. Det er derfor nødvendigt at skønne sammensætningen af proteiner alt efter hvilken form for substrat der er tale om. Den her valgte generelle proteintype ( $C_5H_7NO_2$ ) vurderes at være repræsentativ for proteinindholdet i organisk husholdningsaffald /Angelidaki, 2002/.

### Eksempel 2

Affald indsamlet i Hovedstadsområdet, fælles skraldespande, forbehandlet med skrueseparator i Aalborg den 21/5-2001. Affaldets sammensætning (alle procenter er af TS):

Fedt: 18%

Protein: 18%

Træstof: 13%

VS: 91% af TS

Andre kulhydrater: 42% Beregnet som VS-(fedt + protein + træstof)

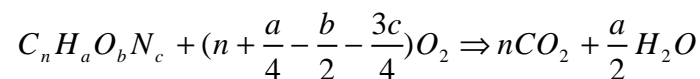
Det teoretiske metanpotentiale beregnes således ud fra værdierne i tabel 1:

$$\begin{aligned}
 B &= 0,18g \text{ fedt} / gTS \cdot 1014 NmlCH_4 / g \text{ fedt} + 0,18g \text{ protein} / gTS \\
 &\cdot 496 NmlCH_4 / g \text{ protein} + 0,13g \text{ træstof} \cdot 415 NmlCH_4 / g \text{ træstof} \\
 &+ 0,42g \text{ kulhydrater} / gTS \cdot 415 NmlCH_4 / g \text{ kulhydrater} \\
 &= 500 NmlCH_4 / gTS \\
 &= 551 NmlCH_4 / gVS
 \end{aligned}$$

2.2 Teoretisk biogaspotentiale beregnet på basis af kemiske samleparametre

#### 2.2.1 Beregning på basis af COD

COD (chemical oxygen demand) repræsenterer iltforbruget ved iltning af det totale indhold af organisk stof i prøven. Der kan derfor angives følgende sammenhæng mellem prøvens indhold af VS og COD (se også afsnit 2.1):



Af afsnit 2.1 fremgår metanproduktionen fra organisk stof:

$$(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8}) molCH_4 / mol \text{ org. stof}$$

↓

$$B_{o,th} = \frac{\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8}\right) \text{molCH}_4 / \text{mol org.stof}}{\left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4}\right) \text{molO}_2 / \text{mol org.stof}}$$

$$= \frac{22,4 \text{NlCH}_4 / \text{molCH}_4 \cdot \left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4}\right)}{32 \text{gO}_2 / \text{molO}_2 \cdot 2\left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4}\right)}$$

$$= 0,35 \text{Nl CH}_4 / \text{g COD}$$

Der findes altså følgende sammenhæng: **0,35 l CH<sub>4</sub>/g COD** ved standardbetingelser (0°C og 1 atm. tryk).

### Eksempel 3

Affald indsamlet i Hovedstadsområdet, fælles skraldespande, forbehandlet med skrueseparator i Aalborg den 21/5-2001.

COD=1,3 g COD/g TS

VS=0,91% af TS

Metanpotentiale = 1,3 g COD/g TS · 0,35 Nl CH<sub>4</sub>/g COD

= 455 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t TS

= 500 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS

#### 2.2.2 Beregning på basis af Volatile Solids (VS)

Gasproduktionen kan ikke beregnes direkte på baggrund af VS, da der er stor forskel på gaspotentialet for forskellige former for VS (se afsnit 2.1). Det er derfor nødvendigt at vide, hvilken form for VS, der er tale om. En metode er at omregne VS til COD. Dette gøres ud fra det støkiometriske forhold ved fuldstændig oxidation af det organiske stof. Forholdet mellem VS og COD afhænger af den kemiske sammensætning af det organiske stof. Den generelle formel for COD/VS-forholdet for organisk stof med formlen C<sub>n</sub>H<sub>a</sub>O<sub>b</sub>N<sub>c</sub> er:

$$\text{COD} / \text{VS} = \frac{\left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4}\right) 32}{12n + a + 16b + 14c}$$

/Angelidaki, 2002/

Tabel 2 viser de beregnede forhold mellem COD og VS for udvalgte organiske komponenter. Anvendelse af disse værdier til beregning af teoretisk biogaspotentiale kræver kendskab til hvilken form for VS der er tale om i den enkelte prøve (kulhydrat, fedt eller protein). Da disse analyser ikke altid foreligger, kan beregningen foretages ud fra en gennemsnitlig sammensætning af VS i organisk affald. Denne sammensætning er beregnet på baggrund af kemisk analyse af 46 prøver af organisk affald. Beregningen viser, at VS i organisk husholdningsaffald gennemsnitligt består af 17,2% fedt, 18,4% protein og 64,4% kulhydrat. Andelen af kulhydrater er beregnet som

restfraktionen af VS efter de målte værdier for fedt og protein er trukket fra. Denne metode benyttes, da der ikke er foretaget fuldstændige analyser af det totale indhold af kulhydrater i affaldet. Denne beregnede fordeling af VS i affaldsprøverne medfører et COD/VS forhold på 1,51.

Tabel 2: COD/VS forhold for organiske komponenter

Substrat	Kemisk formel	COD/VS
Kulhydrat	$(C_6H_{10}O_5)_n$	1,19
Fedt	$C_{57}H_{104}O_6$	2,90
Protein	$C_5H_7NO_2$	1,42
Affald	Sammensat	1,51

Med denne gennemsnitlige sammensætning og et metanpotentiale på 0,35 Nl  $CH_4/g$  COD (se afsnit 2.2.1), vil det teoretiske biogaspotentiale for organisk affald blive **528 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS**.

Ved nærværende metode anvendes således som en tilnærmelse 528 Nm<sup>3</sup>/t VS som en fast værdi uafhængigt af sammensætningen af affaldet i øvrigt. Denne værdi må derfor kun anvendes til beregning af teoretisk biogaspotentiale for kildesorteret organisk dagrenovation.

#### Eksempel 4

Affald indsamlet i Hovedstadsområdet, fælles skraldespande, forbehandlet med skrueseparator i Aalborg den 21/5-2001.

Da dette teoretiske metanpotentiale er givet på VS-basis, er det muligt umiddelbart at angive metanpotentialet for denne prøve til 528 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS.

### 2.3 Realiserede biogaspotentialer

#### 2.3.1 Måling af biogaspotentiale

Biogaspotentialerne måles i batchforsøg over 50 dage ved 55°C. Reaktorerne er 2 liters glasflasker med skruelåg og septum. Til hver batch tilsættes prøve af organisk affald således, at slutkoncentrationen i batchen bliver omkring 2% affalds-VS. Der benyttes inokulum fra et dansk biogasanlæg (Vegger Biogasanlæg), der opererer termofilt ved 55°C. Forsøgene udføres i triplikater med kontrolprøver (udelukkende inokulum og vand) samt referenceprøver, hvor biogaspotentialet fra cellulose måles.

Over forsøgsperioden udtages jævnlige gasprøver (i alt 10-15 gange), hvor metanmængden i et fast volumen headspace analyseres på gaskromatograf. Prøverne udtages med glassprøjte med "pressure lock", hvilket gør det muligt at udtage et fast volumen ved det aktuelle tryk i batchen. Da størrelsen af headspace kendes for hver batch, kan metankoncentrationen og dermed metanproduktionen beregnes. Da der i løbet af forsøget produceres omkring 6 liter biogas ( $CH_4 + CO_2$ ), er det nødvendigt at "luftte" flaskerne 5-6 gange i denne periode. Luftningen foretages, når trykket i batchen nærmer sig 2 bar og sker ved at stikke en kanyle gennem septum og dermed udligne trykket i flasken. Det er nødvendigt at udtage gasprøver både før og efter luftningen.

Resultaterne opgøres i Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton VS ved standardbetingelser (0°C og 1 atm. tryk) som akkumuleret metanproduktion over tid.

### 2.3.2 Realiserede biogaspotentialer for organiske komponenter

Tabel 3 viser realiserede biogaspotentialer fra organiske komponenter, såsom cellulose, glukose, fedt (hvh. svinefedt og planteolie) og protein (gelatine). I tabellen er ligeledes angivet, hvor stor en del af det teoretiske biogaspotentiale der er opnået ved forsøgene. Ved beregning af de teoretiske biogaspotentialer er kemiske formler for de enkelte stoffer (og ikke gennemsnitsformler) benyttet. Dette er muligt, da der er tale om rene organiske komponenter (cellulose og glukose) eller blandinger med kendt indhold (svinefedt, raps olie og gelatine).

Tabel 3: Realiseret og teoretisk biogaspotentiale for organiske komponenter /Marca, 2002/

Substrat	Realiseret biogaspotentiale [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS]	Teoretisk biogaspotentiale* [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS]	Realiseret potentiale [% af teoretisk potentiale]
Cellulose	389	415	94
Glukose	329	373	88
Stivelse	365	415	88
Svinefedt	872	1005	87
Raps olie	867	1023	85
Gelatine	232	410	57

\*)Det teoretiske biogaspotentiale er beregnet ved Buswell's formel ud fra komponentsammensætningen af det enkelte stof.

Det ses, at der opnås over 85% af det teoretiske biogaspotentiale for alle komponenter undtagen gelatine. Det lave metanudbytte fra gelatine kan skyldes ammonium inhibering, da der frigives kvælstof under nedbrydning af proteinerne. Det antages, at det er muligt at opnå omkring 85% af det teoretiske biogaspotentiale, hvis der ikke sker inhibering under processen. Det er ikke muligt at opnå 100% af det teoretiske metanpotentiale, da en del af det organiske stof under processen udnyttes til cellevækst /Angelidaki, 2002/.

Tabel 4 viser realiserede biogaspotentialer samt udvalgte kemiske parametre fra fire prøver af kildesorteret forbehandlet organisk dagrenovation. De analyserede affaldsprøver indgår i et større forskningsprojekt om organisk affald, hvor bl.a. effekten af forskellige forbehandlingsmetoder undersøges. Affaldet er indsamlet i Hovedstadsområdet, Vejle, Aalborg og Kolding og stammer fra henholdsvis fælles og individuelle skraldespande. Forbehandlingen for prøverne er foretaget på skrueseparatoren i Aalborg for de to første prøver og på rullerisigten i Herning for de to øvrige.

Tabel 4: Realiseret biogaspotentiale samt kemisk sammensætning af fire affaldsprøver

	010521_ Ho_F_Aa_A	010927_ Ve_I_Aa_A	011115_ Aa_I_He_A	020116_ Ko_F_He_A
Målt biogaspotential [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS]	425	492	464	404
TS [%]	29	18	31	34
VS [% af TS]	91	86	83	87
COD [mg/kg]*	1300	870	1200	1400
C [%af TS]	52	47	45	48
H [%af TS]	8	6,9	6,4	7,2
S [%af TS]	0,23	0,25	0,24	0,22
O [%af TS]	-	-	-	-
N [% af TS]	3,1	2,7	2,2	2,6
Fedt [% af TS]	18	14	13	15
Protein [% af TS]	18	16	15	16
Træstof [% af TS]	13	10	15	15
Sukker [% af TS]	-	4	8	9
Stivelse [% af TS]	-	16	16	17
Målt øvre brændværdi [MJ/kg TS]	22,1	19,8	19,4	20,1

\*)Bestemmelsen af COD er behæftet med stor usikkerhed pga. analysemetoden.

Ud fra disse kemiske parametre er det muligt at beregne det teoretiske biogaspotential ved hjælp af de forskellige metoder, der er beskrevet i de foregående afsnit. Tabel 5 viser de forskellige teoretiske biogaspotentialer sammenholdt med de målte biogaspotentialer for de fire prøver.

Tabel 5: Beregning af teoretisk biogaspotential på baggrund af forskellige kemiske parametre for fire affaldsprøver. De teoretiske biogaspotentialer er sammenlignet med de målte.

		010521_ Ho_F_Aa_		010927_ Ve_I_Aa_A		011115_ Aa_I_He_		020116_ Ko_F_He_	
		A	% af målt	A	% af målt	A	% af målt	A	% af målt
C,H,O* og N	Nm <sup>3</sup> /t VS	653	153	598	122	583	126	612	151
Org. komp.	Nm <sup>3</sup> /t VS	551	130	529	108	525	113	534	132
VS	Nm <sup>3</sup> /t VS	528	124	528	108	528	114	528	131
Målt gaspot.	Nm <sup>3</sup> /t VS	425	100	492	100	464	100	404	100

\*) Iltindholdet er ikke målt. Det antages, at ilten udgør den resterende del af VS, når N, C, H og S er trukket fra. Dette giver et iltindhold på gennemsnitligt 28%.

### 2.3.3 Sammenligning af målte og beregnede biogasværdier

Som det ses i Tabel 5 giver beregning af teoretiske biogaspotentialer i stort set alle tilfælde højere værdier end de målte biogaspotentialer. Dette er forventeligt, da de teoretiske potentialer er beregnet under forudsætning af 100% omsætning af det organiske stof, hvor der i praksis kan forventes omkring 85% omsætning. Enkelte beregnede metanpotentialer resulterer i en overestimering på 40-60%, hvilket ikke kan forklares med forbrug af organisk stof til f.eks. cellevækst. Beregning af biogaspotential ved hjælp af enkeltstoffer og brændværdier giver de højeste teoretiske potentialer, mens de øvrige beregningsmetoder giver en mindre overestimering for de aktuelle prøver.

## 2.4 Komponenterne i biogas

En del af den dannede CO<sub>2</sub> vil opløses i vandfasen og derfor ikke indgå i en volumenbaseret måling af gasproduktionen. Opløseligheden af CO<sub>2</sub> afhænger af bl.a. temperatur og pH. Kun en forsvindende del af den producerede CH<sub>4</sub> opløses i vandfasen.

Fordelingen mellem  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$  dannet under biogasproduktionen afhænger delvist af substratets sammensætning (se afsnit 2.1.1). For gennemsnitligt organisk dagrenovation kan det beregnes (se afsnit 2.1.1), at den dannede gas vil bestå af 63%  $\text{CH}_4$  og 37%  $\text{CO}_2$ .

I det følgende beregnes, hvor stor en del af den samlede producerede  $\text{CO}_2$  der vil opløses i vandfasen i reaktorerne ved biogaspotentialmålinger i batchforsøg som beskrevet i afsnit 2.3.1. Der benyttes følgende antagelser:

$V_{\text{vandfase}}$  = Vandnolumen

$V_{\text{headspace}}$  = Volumen af headspace

$P_{\text{tot}}$  = tryk i batch

$C_{\text{M}, 55^\circ\text{C}}$  = Mætningskoncentrationen for en gas (her  $\text{CO}_2$ ) ved  $55^\circ\text{C}$

$V_{\text{vandfase}} = 0,5$  liter

$V_{\text{headspace}} = 1,5$  liter

$\text{pH} = 7,1$

$P_{\text{tot}} = 1,5$  atm.

$C_{\text{M}, 55^\circ\text{C}} = 0,67$  g/L =  $1,52 \cdot 10^{-2}$  M

$$K_H = \frac{P_{\text{tot}}}{C_M}$$

↓

$$K_H = \frac{1,5 \text{ atm}}{1,52 \cdot 10^{-2} \text{ M}} = 98,51 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol}}$$

$\text{CO}_2$  i vandfasen vil indgå i carbonatsystemet. Det antages, at ligevægten mellem  $[\text{CO}_2]$  og  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  er forskudt kraftigt i retning af  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  og at det opløste  $[\text{CO}_2]$  derfor kan regnes som  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ . Det antages ligeledes, at bidraget fra carbonatsystemets komponenter i startsituationen er negligabelt.

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = \frac{P_{\text{tot}} \cdot X_{\text{CO}_2}}{K_H}$$

↓

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = \frac{1,5 \text{ atm} \cdot 0,37}{98,51 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol}}} = 5,63 \cdot 10^{-3} \text{ M}$$

Ud fra denne koncentration kan koncentrationerne af karbonatsystemets øvrige komponenter beregnes ud fra følgende ligninger ( $K_1$  og  $K_2$  er beregnet for  $55^\circ\text{C}$ ):

$$K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 5,07 \cdot 10^{-7}$$

$$K_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 6,92 \cdot 10^{-11}$$

↓

$$[\text{HCO}_3^-] = 3,59 \cdot 10^{-2} \text{ M}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 3,13 \cdot 10^{-5} \text{M}$$

↓

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] = 4,16 \cdot 10^{-2} \text{M}$$

Dette er den maksimale koncentration, der kan opløses i vandfasen og da der ses bort fra startkoncentrationen af komponenterne, antages denne mængde at stamme fra opløst  $\text{CO}_2$  fra biogasprocessen. Da  $V_{\text{vandfase}} = 0,5 \text{L}$  drejer det sig om  $2,08 \cdot 10^{-2} \text{mol}$ .

Mængden af  $\text{CO}_2$  i luften kan beregnes ud fra idealgas ligningen:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1,5 \text{atm} \cdot 1,5 \text{L} \cdot 0,37}{0,0821 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 328 \text{K}} = 3,09 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$$

Andelen af  $\text{CO}_2$ , der optages i vandfasen beregnes:

$$X_{aq} = \frac{2,08 \cdot 10^{-2}}{3,09 \cdot 10^{-2} + 2,08 \cdot 10^{-2}} = 40 \%$$

Omkring 40% af den dannede  $\text{CO}_2$  i flasken er derfor at finde i vandfasen ved det aktuelle tryk. Den mængde  $\text{CO}_2$ , der kan måles direkte i luften i headspace, vil derfor være lavere end den mængde  $\text{CO}_2$ , der teoretisk set dannes ved biogasprocessen.

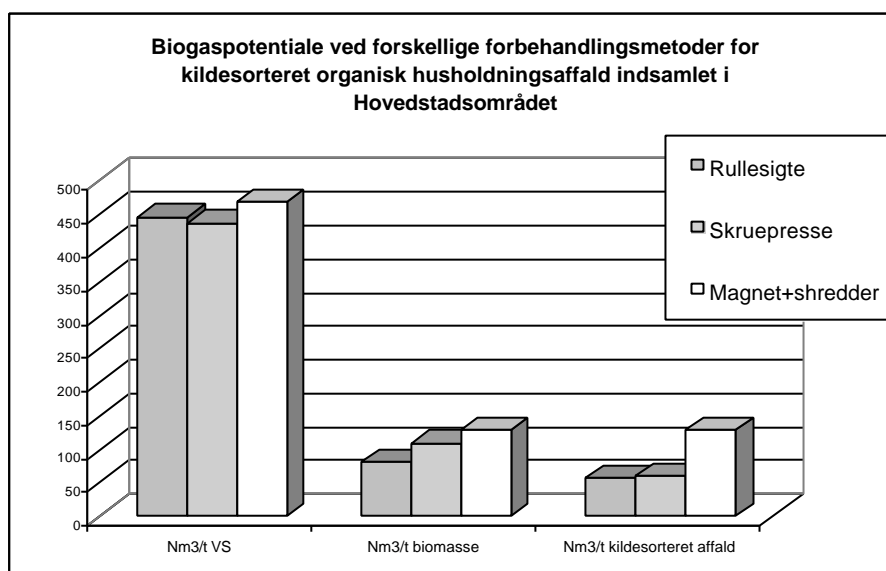
Beregningerne er baseret på de aktuelle batchforsøg udført på DTU. I forsøgene varierer det aktuelle tryk i hver batch i takt med gasdannelse og luftning. Beregningen afspejler et tilfældigt valgt tidspunkt i forløbet, hvor trykket er 1,5 atm. og totalindholdet af  $\text{CO}_2$  i batchen er 0,05 mol. Hver batch i de omtalte forsøg indeholder omkring 9 g VS. Omsætningsgraden for VS antages at være 85% og kulstofindholdet er bestemt til 50g C/g VS. Der omsættes altså 3,83 g C = 0,32 mol C pr. batch. Da der ved omsætningen dannes 63%  $\text{CH}_4$  og 37%  $\text{CO}_2$ , giver dette en  $\text{CO}_2$ -produktion på 0,12 mol  $\text{CO}_2$ . Dette er omkring det dobbelte af den samlede mængde  $\text{CO}_2$ , som findes i beholderen ved ligevægt i henhold til ovenstående beregninger. Det antages derfor, at den resterende mængde  $\text{CO}_2$  endnu ikke er dannet eller er bortventileret ved luftning.

Det understreges, at bestemmelsen af metandannelsen ikke påvirkes af, at en del af det dannede  $\text{CO}_2$  forbliver i væskefasen.



## 2.5 Biogaspotentialer i forhold til affald

Biogaspotentialer for affaldsprøver kan opgøres på forskellig måde. Resultaterne fra laboratorieforsøgene opgøres i  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t VS}$ . Disse resultater kan ligeledes opgøres som metanpotentialer på basis af biomasse (våd vægt) eller kildesorteret affald (våd vægt), se Figur 1. Enheden for metanpotentialer har stor betydning. Opgørelse på basis af VS giver indtryk af omsætteligheden og energiindholdet af den organiske del af biomassen. Opgørelse på biomasse (W/W) basis viser, hvor meget biogas ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}$  biomasse, W/W) biogasanlægget kan forvente at få ud fra en kendt mængde biomasse. Opgørelse på basis af kildesorteret affald (W/W) giver indtryk af den forventelige mængde biogas ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}$  kildesorteret dagrenovation, W/W) for en kendt mængde indsamlet kildesorteret organisk dagrenovation. Her medtages effektiviteten i forbehandlingsanlægget og denne opgørelse er derfor specifik for de enkelte forbehandlingsmetoder (de øvrige opgørelser er gjort på basis af prøver forbehandlet på de enkelte forbehandlingsanlæg, men andelen af biomasse og rejekt fra forbehandlingen af den enkelte prøve indgår ikke i beregningerne).



Figur 1: Gaspotentialer fra forskellige forbehandlingsmetoder opgørt på forskellig basis, henholdsvis VS-, biomasse- og kildesorteret affaldsbasis.

## 3 Brændværdi

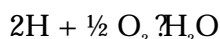
Mængden af energi i affald opgøres i form af brændværdi, som redegjort for i dette afsnit.

### 3.1 Definition af brændværdi

#### 3.1.1 Øvre og nedre brændværdi

Affaldets brændværdi afhænger af sammensætningen, og kan vurderes enten ud fra den kemiske sammensætning eller en fysisk sammensætning. Den fysiske vurdering indebærer en opgørelse af indholdet af plast, papir mm., hvor brændværdien af disse fraktioner er kendt. Men ved organisk dagrenovation, som primært består af organisk madaffald og evt. nogle tørre og våde papirfraktioner, er denne metode ikke relevant.

Den nedre brændværdi medtager energitabet til fordampning af vandindholdet i affaldet, hvorimod den øvre brændværdi betragter vandet i kondenseret form. Dette inkluderer ikke kun fordampningsenergien for vandmængden i affaldet, men også vanddamp, som dannes ud fra brintindholdet i affaldet:



#### 3.1.2 Måling af brændværdi

Den øvre brændværdi, HHV, af affald kan måles ved en fint neddelte, homogeniseret, tør prøve i et bombekalorimeter, hvor en lille mængde prøvemateriale indsættes. Bombekalorimeteret er et lukket system, hvor prøven bliver antændt under tryk. Den øvre brændværdi beregnes ud fra temperaturstigning med hensyntagen til den tilførte energi til antændelse af prøven, forbrænding af ledningstråden og for termiske effekter fra dannelse af bl.a. saltpetersyre. Ved denne metode måles den øvre brændværdi, og det antages derfor at vanddampen, som er dannet af vandindholdet samt af brintindholdet, kondenserer hurtigt igen, da antændelsen sker ved 25°C /ISO 1928:1995/.

Ønskes den nedre brændværdi skal der tages højde for den dannede vandmængde, som opstår pga. brint- og vandindholdet i prøven.

### 3.2 Beregning på basis af kemiske oplysninger

#### 3.2.1 Beregning på basis af grundstofsammensætning

En empirisk formel til beregning af brændværdi er opstillet på baggrund af affaldets indhold af kulstof, brint, svovl, kvælstof, ilt og vand. Det ses, at især kulstof- og brintindholdet bidrager positivt til brændværdien, hvor ilt- og vandindholdet trækker fra.

Nedre brændværdi ved Schwanecke's formel [MJ/kg] /Schwanecke, 1976/:

$$\text{LHV} = 34,8 \cdot X_C + 93,9 \cdot X_H + 10,5 \cdot X_S + 6,3 \cdot X_N - 10,8 \cdot X_O - 2,44 \cdot X_{\text{H}_2\text{O}}$$

Øvre brændværdi, HHV [MJ/kg]:

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 2,44 \cdot (X[\text{H}_2\text{O}] + 8,9 \cdot X[\text{H}])$$

hvor

LHV: nedre brændværdi [MJ/kg]

HHV: øvre brændværdi [MJ/kg]

X: indhold af parameter [kg/kg]

### Eksempel 6

Hvis den øvre brændværdi, HHV på en tør prøve er målt til 22 MJ/kg TS, og prøven indeholder 7 % H af TS, kan den nedre brændværdi af TS beregnes:

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= \text{HHV} - X[\text{H}] \cdot 8,9 \text{ kg H}_2\text{O/kg H} \cdot 2,44 \text{ MJ/kg H}_2\text{O} \\ &= 22 \text{ MJ/kg TS} - 0,07 \text{ kg H/kg TS} \cdot 8,9 \text{ kg H}_2\text{O/kg H} \cdot 2,44 \text{ MJ/kg} \\ &\text{H}_2\text{O} = 20,5 \text{ MJ/kg TS} \end{aligned}$$

### 3.3 Beregnede og målte brændværdier

Tabel 6 viser affaldssammensætning for forbehandlet kildesorteret organisk dagrenovation. Tabellen viser de nødvendige parametre i affaldet til teoretisk beregning af brændværdi. Der er dog ikke målt ilt i affaldet, så til den teoretiske brændværdi er antaget et iltindhold på forskellen mellem indholdet af VS og indholdet af C, H, S og N. Tabellen viser ikke altid overensstemmelse mellem den målte og den teoretiske brændværdi med udsving på op til 11 %. Det betyder, at Schwanecke's formel til beregning af nedre brændværdier ikke ukritisk kan anvendes, såfremt brændværdien ikke måles eksperimentelt ved et bombekalorimeter.

Tabel 6: Kemisk sammensætning i 4 affaldsprøver

	010521_		010927_		011115_		020116_	
	Ho	F Aa A	Ve	I Aa A	Aa	I He A	Ko	F He A
TS [%]	29		18		31		34	
VS [% af TS]	91		86		83		87	
COD [mg/kg]	1300		870		1200		1400	
C [%af TS]	52		47		45		48	
H [%af TS]	8		6.9		6.4		7.2	
S [%af TS]	0.23		0.25		0.24		0.22	
O [%af TS] (beregnet som forskel)	27.7		29.2		29.2		29.0	
N [% af TS]	3.1		2.7		2.2		2.6	
Målt øvre brændværdi [MJ/kg TS]	22.1		19.8		19.4		20.1	
Teoretisk nedre brændværdi [MJ/kg TS] *	22.8		19.9		18.7		20.5	
Teoretisk nedre brændværdi [MJ/kg vådt affald]	4.9		1.6		4.1		5.4	
Teoretisk øvre brændværdi [MJ/kg TS] *	24.6		21.4		20.1		22.1	

\*: under antagelse at iltindholdet er VS - (C+H+N+S)

### Eksempel 7

Affald indsamlet i Hovedstadsområdet, fælles skraldespande, forbehandlet med skrueseparator i Aalborg den 21/5-2001. Beregning af den nedre brændværdi, LHV, af TS vha. Schwaneckes formel:

$$\text{LHV} = 34,8 \cdot 0,52 + 93,9 \cdot 0,08 + 10,5 \cdot 0,0023 + 6,3 \cdot 0,031 - 10,8 \cdot 0,277 - 2,44 \cdot 0 = 22,1 \text{ MJ/kg TS}$$

Hvis prøven er våd og har et TS indhold på 29 % fås:

$$\text{LHV} = 0,29 \cdot (34,8 \cdot 0,52 + 93,9 \cdot 0,08 + 10,5 \cdot 0,0023 + 6,3 \cdot 0,031 - 10,8 \cdot 0,277) - 2,44 \cdot 0,71 = 4,9 \text{ MJ/kg affald}$$

### 3.4 Brændværdi i forhold til affald

Den producerede biogas kan brændes af i en gasmotor med kedelanlæg med kombineret el og varmeproduktion eller i en gasmotor med elproduktion alene. Energieffektiviteten i et kedelanlæg med kombineret el og fjernvarmeproduktion er som på et forbrændingsanlæg på mellem 80 og 90 % af indfyret, dog er elvirkningsgraden typisk højere end i et forbrændingsanlæg. Antages, at biogassen indeholder 65 % metan med nedre brændværdi på 35,9 MJ/Nm<sup>3</sup> og en virkningsgrad på 85 % i gasmotoren, opnås en samlet energiproduktion på 19,8 MJ pr. Nm<sup>3</sup> biogas. Produceres kun el på gasmotoren falder energivirkningsgraden væsentlig og vil ligge på mellem 30 og 40 % alt afhængig af type af gasmotor.

Som alternativ kan biogassen renses for CO<sub>2</sub> og kan derefter anvendes som naturgas i evt. busser, men dette kræver tilført energi og et dyrt anlæg til fjernelse af CO<sub>2</sub>. Ud fra en energimæssig betragtning kan det ikke svare sig, da der ikke vil opnås højere energivirkningsgrader, og den energi, der anvendes til oprensning af biogassen, ikke opvejes.

Ved forbrænding af affald i et forbrændingsanlæg svarer den afsatte energimængde stort set til den nedre brændværdi af affaldet, der som nævnt tager hensyn til, at vandindholdet fordampes under forbrændingsprocessen. Vandindholdet har således betydning for energiproduktionen, da fordampningsvarmen af vand normalt mistes.

Dette har dog kun mindre betydning ved forbrænding af "normalt" affald med et vandindhold på omkring 20% og nedre brændværdi på 10-12 MJ/kg. Derimod kan effekten være betydelig ved forbrænding af vådt organisk affald, som typisk indeholder omkring 70 % vand. Betydningen af vandindholdet kan illustreres ved forskellen mellem øvre og nedre brændværdi for vådt organisk affald, hvor en øvre brændværdi på 7 MJ/kg, typisk modsvarer af en nedre brændværdi på omkring 5 MJ/kg.

Den varme røggas fra forbrændingsprocessen udnyttes til at opvarme damp, som driver en turbine og/eller anvendes i en varmeveksler til opvarmning af fjernvarmevand. Ved kombineret el- og varmeproduktion er effektiviteten på 80-90 % af den indfyrede energi hvorimod ved el-produktion alene falder effektiviteten til omkring 30 %.

Virkningsgraden forøges på nogle forbrændingsanlæg ved at kondensere vanddamp fra røggassen, idet fordampningsvarmen genvindes ved kondensation og derved kan nyttiggøres. I så fald kan effektiviteten principielt forøges til over 100% af den indfyrede energi, hvilket dog ikke strider mod naturens love, da den indfyrede energi opgøres på grundlag af nedre brændværdi.

## 4 Referencer

Angelidaki, 2002: Iridi Angelidaki, *Environmental Biotechnology 12133*, Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark, 2002

International Standard ISO 1928:1995 (E): *Solid mineral fuels – Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value*

Marca, Emilia, 2002: *Determination of biochemical methane potentials of organic waste*, Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark, 2002

Miljøstyrelsen, 2001: *Affaldsstatistik, 2000*, Miljø- og Energiministeriet 2000

Schwanecke, 1976: *Formeln und Hilfmonogramme für die Anwendung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft*, Wasser, Luft und Betrieb, 20, 607-609

Steinmüller, 1992, Steinmüller, *Taschenbuch*, Dampferzeugertechnik, 25. Auflage, Vulkan-Verlag, 1992

# Bilag 4

## DTU-Biogasmodel: Modeldokumentation, scenarier og resultater

Janus Torsten Kirkeby og Thomas H. Christensen, Miljø & Ressourcer,  
DTU

Tore Hulgaard, Rambøll

November 2002



# Indhold

<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>	<b>7</b>
<b>1. DEL: MODELDOCUMENTATION</b>	<b>9</b>
1.1 INDLEDNING	9
1.2 SYSTEMBESKRIVELSE AF BIOFORGASNING	9
1.2.1 <i>Introduktion</i>	9
1.2.2 <i>Kildesortering</i>	10
1.2.3 <i>Indsamling</i>	10
1.2.4 <i>Forbehandling inden bioforgasning</i>	11
1.2.5 <i>Blandingstank</i>	11
1.2.6 <i>Deponering af bundfald</i>	11
1.2.7 <i>Hygiejnisering</i>	12
1.2.8 <i>Biogasreaktor</i>	12
1.2.9 <i>Efterseparering</i>	12
1.2.10 <i>Forbrænding af biogas</i>	13
1.2.11 <i>Efterlagring af gødningsvæske</i>	13
1.2.12 <i>Brug af gødningsvæske</i>	13
1.2.13 <i>Forbrænding af rejekt samt af fiberfraktion</i>	13
1.2.14 <i>Transporter</i>	14
1.3 MODELLERING AF BIOFORGASNING	14
1.3.1 <i>Modelafgrænsning</i>	14
1.3.2 <i>System</i>	15
1.3.3 <i>Inndata</i>	16
1.3.4 <i>Grundlæggende forudsætninger</i>	20
1.3.5 <i>Affaldskarakterisering</i>	21
1.3.6 <i>Tekniske specifikationer for delprocesser</i>	23
1.3.7 <i>Resultater fra modelberegninger</i>	38
<b>2. DEL: SCENARIER OG RESULTATER</b>	<b>45</b>
2.1 INDLEDNING	45
2.2 REFERENCE SCENARIO	47
2.2.1 <i>Anvendte teknologier i referencescenariet</i>	47
2.2.2 <i>Resultater for referencescenariet</i>	50
2.2.3 <i>Fortolkning af resultater</i>	55
2.3 SCENARIER MED ÆNDREDE PARAMETRE	56
2.3.1 <i>Ændrede kildesorteringskriterier</i>	56
2.3.2 <i>Lavere energiforbrug til indsamling</i>	58
2.3.3 <i>Øget transportafstand til biogasanlæg</i>	60
2.3.4 <i>Øget biogasproduktion</i>	62
2.3.5 <i>Elproduktion alene fra biogasmotor</i>	65
2.3.6 <i>Mindsket metanudslip fra gasmotor</i>	67
2.3.7 <i>Metanudslip ved efterlagring</i>	68
2.3.8 <i>Fjernvarmeproduktion alene ved forbrændingsanlæg</i>	71
2.3.9 <i>Energisubstitution baseret på hhv. kul og naturgas alene</i>	73



2.4	SAMMENFATNING AF SCENARIEBEREGNINGER	75
2.5	SAMMENLIGNING AF AFFALDSSAMMENSÆTNINGER	77
<b>3.</b>	<b>REFERENCER</b>	<b>83</b>
	<b>APPENDIKS A: SYSTEMFIGUR</b>	<b>91</b>
	<b>APPENDIKS B: NAVNGIVNING AF PROCESSER OG AFFALDSTYPER</b>	<b>93</b>
	<b>APPENDIKS C: VBA MAKROKODE</b>	<b>97</b>

# Forord

Denne rapport er udarbejdet i et samarbejde mellem Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Rambøll (Virum), og Afdelingen for Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Lunds Tekniska Högskola med støtte fra Miljøstyrelsens program for renere teknologi m.v. og en række affaldsaktører i Hovedstadsområdet (Københavns Kommune, R-98 og I/S Vestforbrænding).

Rapporten er forfattet af Janus T. Kirkeby, Miljø & Ressourcer, med bistand fra Tore Hulgaard, Rambøll og Thomas H. Christensen, Miljø & Ressourcer, DTU.

Konklusioner og vurderinger i nærværende rapport er forfatterens ansvar og udtrykker ikke nødvendigvis de finansierendes parters synspunkt.

DTU, oktober 2002

Thomas H. Christensen



# Sammenfatning og konklusioner

Denne bilagsrapport præsenterer i 1. del modeldokumentationen for DTU-Biogasmodellen. I 2. del præsenteres de miljømæssige vurderinger af en række scenarier for bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation. En række scenarier er opstillet til vurdering af fordele og ulemper ved bioforgasning i forhold til forbrænding ved forskellige teknologivalg og ændrede parametre. Scenarierne har alle som udgangspunkt en kildesorteret mængde af organisk dagrenovation på 1000 kg.

Beregningerne af massestrømme, energi, emission af drivhusgasser samt udnyttelse af næringssalte er beregnet med DTU-Biogasmodellen, som er beskrevet i 1. Del.

Det teknologiske system omfatter indledningsvis en indsamling af det kildesorterede organiske dagrenovation og en forbehandling, der fjerner urenheder, som ikke er velegnet til bioforgasning. Forbehandlingen omfatter flere alternativer: En rullesigte som ind til for nylig blev anvendt i Herning, en skrueseparator som anvendes i Vaarst-Fjellerød og en stempelpresse som der er kørt forøg med på AFAV, Frederikssund. Endvidere indgår beregninger baseret på 2 hypotetiske forbehandlinger. Bioforgasningen sker termofilt mens rejktet forbrændes. Biogassen benyttes til energifremstilling og det afgassede materiale udbringes som gødning på jord.

Beregningerne i første del af rapporten er foretaget på basis af affaldsdata gældende specifikt for Hovedstadsområdet, suppleret med generelle data for blandt andet transport og energifremstilling. Beregninger er gennemført for en række alternative scenarier hvad angår kildesorteringskriterier, energiforbrug ved indsamlingen, transportafstande, gasmængde produceret på anlæg, metanemission ved gasmotor og efterlagring samt energiproduktion og energisubstitution. Desuden er der foretaget beregninger, hvor affaldssammensætning og 2 eksisterende forbehandlinger sammenlignes. Dette er gjort ud fra analyser fra indsamlet kildesorteret dagrenovation fra 5 områder: Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, Ålborg og Grindsted.

Resultaterne viser, at overordnet set er de miljømæssige forhold hvad angår energi og drivhusgasser nogenlunde ens for bioforgasning og forbrænding for alle undersøgte scenarier: Langt de fleste scenarier giver energiudbytte mellem 3000-3400 MJ primær energi per 1000 kg organisk dagrenovation med eksisterende forbehandlingsteknologier og bioforgasning, men også ved usorteret indsamling og forbrænding. Der er en svag tendens til at bioforgasningen netto giver lidt mere energi end forbrænding. Forskellen mellem alternativerne skønnes at være af samme størrelse som usikkerheden på beregningerne eller indflydelsen af lokalspecifikke forhold. Et ”idealiseret” system med en effektiv forbehandling, begrænset transport og en høj produktion af biogas vil kunne give et samlet energiudbytte på 4200 MJ/1000 kg organisk dagrenovation, hvilket er 25 % mere energi end ved forbrænding af den samme mængde organisk dagrenovation. Drivhusgasemissionen følger stort set energiforbruget.

Et højt tørstofindhold i det kildesorterede organiske dagrenovation medfører en større energiproduktion uanset om det foregår ved bioforgasning eller forbrænding. Beregninger viser desuden, at rejktmængden ikke har særlig indflydelse på

resultatet, og dannes ikke et rejekt, som i Grindsted, har dette særlig ingen positiv effekt på hverken energi- eller drivhusgasbalancen.

Ved bioforgasning dannes et udrådningsprodukt, der potentielt kan anvendes som gødning i jordbruget. Denne mængde udgør ca. 3-8 kg kvælstof, 0,5-1,1 kg fosfor og 1,2-2,6 kg kalium per ton organisk dagrenovation indsamlet. Den energimæssige fordel ved den substitution af kunstgødning er indregnet i de energimæssige betragtninger ovenfor.

# 1. DEL: MODELDOKUMENTATION

## 1.1 Indledning

Bioforgasning af organisk dagrenovation involverer separat indsamling af det organiske dagrenovation ved kilden samt en række teknologiske procestrin som forbehandling, bioforgasning og oplagring af forgasset materiale. Det kildesorterede affald vil eventuelt afhænge af kilden og de benyttede sorteringskriterier, ligesom de enkelte procestrin kan udformes teknologisk forskelligt. Bioforgasning af organisk dagrenovation er således ikke en bestemt løsning men potentielt mange forskellige løsninger.

Ud fra ønsket om en konsistent beskrivelse af disse alternativer samt muligheden for at simulere ændringer i de enkelte delprocesser er det opbygget en excell-baseret model: DTU-BIOGASMODEL (vs 1.00) . Modellen beregner for et defineret system masseflow, næringstof-output, energiforbrug og –produktion samt drivhusgasser.

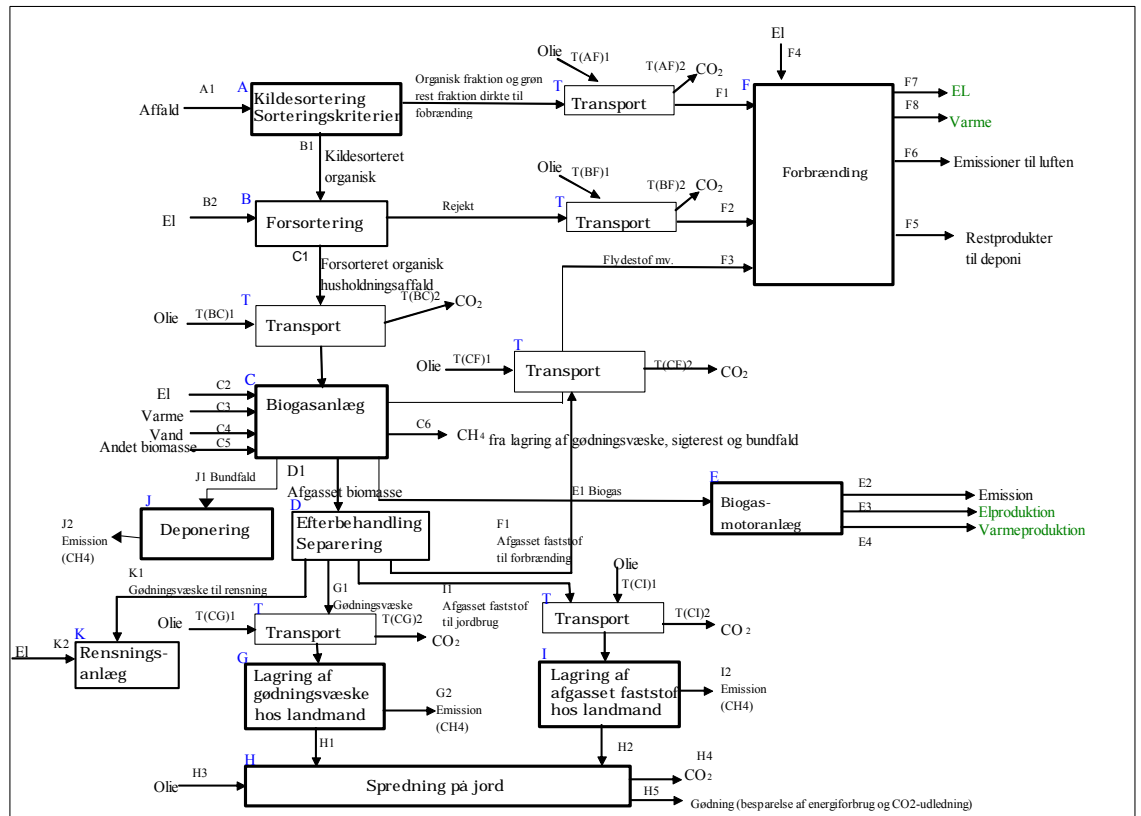
I modellen indgår forbrænding af rejektet fra den biologiske behandling af affaldet. Modellen kan derfor også beregne konsekvenserne i form af ovenstående parametre for en løsning med forbrænding uden bioforgasning af det organiske dagrenovation.

Denne rapport indeholder dokumentationen af modellen. Modellens anvendelse af på en række scenarier er beskrevet i 2. del.

## 1.2 Systembeskrivelse af bioforgasning

### 1.2.1 Introduktion

Formålet med dette afsnit er at beskrive de teknologiske systemer og processer, som kildesorteret organisk dagrenovation gennemgår fra det indsamles, modtages på forbehandlingsanlægget inden bioforgasning til den producerede gødning anvendes og biogas forbrændes. Figur 1-1 skitserer ruten for affaldsfraktionerne igennem systemet. Det er vigtigt, at understrege at der findes mange forskellige metoder til hver enkelt delproces i et biogassystem. I dette afsnit præsenteres de mere almindelige processer, som benyttes på anlæg i Danmark.



Figur 1-1: Grundprincip ved bioforgasning af kildesorteret organisk affald i Danmark

### 1.2.2 Kildesortering

Kildesorteringen og sorteringskriterier er bestemmende for sammensætningen og mængde af affald, som bliver ført til et biogasanlæg. Kildesortering er bestemt af de offentlige myndigheder vha. en sorteringsvejledning, som normalt deles ud til husstandene. Husstandenes deltagelse og deres sorteringseffektivitet har også betydning for mængder og kvalitet af det, der bliver indsamlet separat til biologisk behandling.

### 1.2.3 Indsamling

De miljømæssige påvirkninger fra indsamling af dagrenovation opstår hovedsageligt pga. et forbrug af diesel til indsamlingsbilerne. Traditionelt bliver dagrenovation (med undtagelse af glas og papir) indsamlet ved kilden i en vogn, evt. i en kompressorbil. Ved genanvendelse af organisk dagrenovation til eksempelvis bioforgasning, indsamles denne fraktion, således den er adskillelig fra restfraktion. Typisk sker indsamling af organisk dagrenovation og restfraktionen separat, idet indsamlingsvognen kun indsamler en fraktion ad gangen. Alternativt kan indsamlingen foregå i indsamlingsvogne med 2 kamre eller i vogne med et kammer, hvor den organiske fraktion og restfraktion er i forskelligt farvede poser, således et optisk sorteringsanlæg senere kan separere poser med organisk dagrenovation fra poser med restaffald. Der er ikke regnet med energiforbrug til poser eller anden emballage i forbindelse med indsamlingen, da der forventes stort set samme totale forbrug af poser i hver af de betragtede indsamlingssystemer. Dette er ikke nødvendigvis tilfældet i andre indsamlingssystemer.

Anvendes separat indsamling med samme hyppighed som traditionel indsamling, må det forventes, at dieselforbruget til indsamling vil øges væsentligt, da to

indsamlingsvogne skal køre samme rute. Der vælges dog ofte indsamling med mindre hyppighed, da der vil være opsat ekstra containere til organisk dagrenovation, således kapaciteten vil øges ved husstandene.

Indsamlingsområdets beskaffenhed kan også have indflydelse på dieselforbruget. Undersøgelser (Vrgoc. m.fl., 2002) antyder, at der kan være et væsentlig større brændstofforbrug ved indsamling af affald fra landdistrikter i forhold til byområder. Der er dog ikke væsentlige forskelle på dieselforbruget mellem villaområder, city og etagebebyggelser opgjort per ton indsamlet affald.

Umiddelbart efter indsamling køres affaldet fra indsamlingsområdet til et behandlingsanlæg. Under denne transport forbruges diesel, som hovedsageligt er afhængig af dieselforbruget for den pågældende indsamlingsvogn samt den gennemsnitlige transportafstand fra selve indsamlingsområdet til behandlingsanlægget.

#### 1.2.4 Forbehandling inden bioforgasning

Forbehandling består ofte af 2 elementer: En sortering og en finneddeling, som henholdsvis har til formål at frasortere plast og andre fejlsorterede elementer fra den organiske affaldsfraktion og at neddele affaldet til mindre komponenter, som nedbrydes lettere og hurtigere i biogasreaktoren. Forbehandlingen foretages dels for at undgå problemer under det videre forløb med pumpning osv., og dels for at opnå et gødningsprodukt uden urenheder af plast og metal efter bioforgasningen. Den frasorterede del forbrændes oftest. Mængde og tørstofindholdet i rejektet er af betydning for den samlede energiudvinding, da denne forbrænding medtages i det samlede system, der betragtes i modellen.

Forbehandlingen foregår i fuldskala i Danmark med rullensigte og neddelere eller med en hydraulisk skruepresse, som presser væske og mindre komponenter ud gennem en si.

#### 1.2.5 Blandingstank

Anaerob nedbrydning af organisk dagrenovation foregår i Danmark typisk sammen med gylle. Det fint neddelte affald blandes med gylle ofte i en pulper typisk i forholdet 1:4 eller 1:5. Flydende industriaffald anvendes også til samrødning i bioforgasningsprocessen. Så længe det organiske affald udgør mindre end 25 % kan udbringning af gødningsvæsken ske efter husdyrbekendtgørelsen (Bek nr. 877, 1998), mens udbringning ellers sker efter slambekendtgørelsen (Bek. nr.49, 2000). Den afgassede biomasse, der kommer ud af biogasreaktoren, er flydende med et tørstofindhold på 2-5 %.

#### 1.2.6 Deponering af bundfald

I blandetanken nedfældes tunge materialer, som udtages fra bunden af blandingstanken. Det materiale er slamlignende med bl.a. sten og grus, kan udgøre op til 10 % af den tilførte affaldsmængde (Herning Kommune Værker, 1993). Det antages dog, at mængden i dag er væsentlig lavere. Tørstofprocenten er forholdsvis lav i denne slam (ca. 5-10 %) da gylle ofte udgør ca. 80-90 % af den samlede mængde i blandingstanken. Bundfaldet er ikke forbrændingseget og køres derfor på deponi. Indholdet af organisk tørstof (VS) er medvirkende til en metandannelse i deponiet. Det skal dog understreges, at størrelsen på denne metandannelse er ukendt og ikke hidtil målt. Der er derfor stor usikkerhed på skøn af metandannelse fra deponi af bundfald. Den vil dog kunne estimeres, hvis mængden og indholdet af VS måles på denne massestrøm.



### 1.2.7 Hygiejnisering

Hygiejniseringen kan ved termofil udrådning ske ved opvarmning til 65 °C i en time eller 5,5 time ved 55 °C. Ved mesofil udrådning opvarmes materialet i 1,5 time ved 65 °C eller 7,5 time ved 55 °C (Bek. nr. 49, 2000). Hygiejniseringen har til formål at reducere koncentrationerne af salmonella til et niveau, som ikke kan måles, samt at koncentrationen af fækal streptokokker skal være mindre end 100 g<sup>-1</sup>.

### 1.2.8 Biogasreaktor

Selve bioforgasningen af organisk stof foregår i biogasreaktoren. Ofte foregår nedbrydningen enten ved ca. 37 °C (mesofil) eller ved 55 °C (termofil). Temperaturen har betydning for nedbrydningshastigheden, og opholdstiden har betydning for nedbrydningsgraden i reaktoren. Der foregår en omrøring i reaktoren, for at sikre en homogen biomasse samt en stabil gasproduktion. Gasproduktionen i reaktoren afhænger meget af nedbrydeligheden af materialet. Lignin har sandsynligvis en hæmmende effekt for biogasproduktion, da lignin ligger uden på cellulosen, hvorimod fedt og protein medvirker til en stor biogasproduktion.

Efter udrådningen i biogasreaktoren føres materialet videre til en lagertank, hvor biogasproduktionen kan fortsætte langsomt. Gassen opsamles typisk også herfra og metanemission til atmosfæren undgås.

Gasmåling fra reaktor og lagertank har ofte forvoldt store vanskeligheder og har meget ofte været upræcise. Derudover ligger et andet problem i at fordele den samlede gasproduktion på den organiske dagrenovation og på gyllen. Det gøres som regel på baggrund af VS indholdet i de 2 affaldstyper, men det kan være en usikker fordeling, idet det organiske materiale i gylle oftest er sværere nedbrydeligt end organisk dagrenovation. Det skyldes netop, at der findes mere lignin i gylle end i dagrenovation.

### 1.2.9 Efterseparering

Efterseparering består af at separere den afgassede materiale i 2 fraktioner: en flydende og en fast. Den flydende fraktion udgør af den samlede mængde affald mellem 400 og 800 kg per ton kildesorteret organisk affald. Der er dog få data om størrelserne på denne mængde, og ved beregning af mængden skal der desuden tages hensyn til den tilsatte gylle. På Nordsjællands Biogasanlæg udgjorde den flydende gødningsfraktion ca. 900 kg/ton affald, og denne høje værdi skyldtes at der blev tilsat store mængder vand til reaktoren, ca. 600 l/ton affald (la Cour Jansen, 1996). Den faste fraktion har meget varierende størrelse afhængig af hvilket formål efterseparering har. Mængden af fast stof kan være meget lille, hvis formålet er at fjerne urenheder fra gødningsvæske, men derimod kan den være stor, hvis formålet er, at opnå et gødningsprodukt uden for meget væske, således at udbringning af gødning lettes, da mængden er mindre.

Tørstofindholdet i den flydende gødningsvæske er normalt på 2-5 %, og denne anvendes normalt på jordbruget. Den faste fraktion har også en gødningsværdi for planter, men denne fraktion brændes dog ofte, pga. for høje koncentrationer af uønskede stoffer.

### 1.2.10 Forbrænding af biogas

Forbrænding af biogas sker ofte på en fælles el- og fjernvarmemotor, således energien i biogassen udnyttes mest effektivt, ca. 85 % (Møller m.fl., 1999). Energiindholdet i biogassen afhænger alene af metanindholdet, som ligger i intervallet 55 % til 75 %, ofte omkring 65 % volumenmæssigt. Metan har en brændværdi på 890,8 kJ/mol, (Lide, 1992), hvilket medfører at biogas med 65 % metan har en brændværdi på ca. 24 MJ/Nm<sup>3</sup>.

En del af biogassen slipper dog uforbrændt igennem biogasmotoren. Udslippet er målt til ca. 3 % af biogassen, hvilket ikke betyder noget væsentligt i forhold til energiregnskabet. Derimod har metanudslippet en væsentlig betydning i forhold til udslippet af drivhusgasser, da metan vægtes 25 gange tungere end CO<sub>2</sub>, (Hauschild m.fl., 1997).

### 1.2.11 Efterlagring af gødningsvæske

Den flydende afgassede gødningsvæske transporteres til nærliggende gårde, som bruger gødningsvæskens næringsværdi på markerne. Landbruget er dog forpligtet til at overholde krav til spredning af gylle, hvorfor de involverede landmænd har pligt til at opbevare gødningsvæsken indtil gødnings sæsonen begynder, normalt svarende op til 9 måneder (Bek nr. 877, 1998). Ved denne opbevaring kan der ske en metandannelse, da der sandsynligvis ikke vil forekomme totalt aerobe forhold i gyllebeholderen. Denne metandannelse er dog hidtil ikke målt. Metandannelsen vil afhænge af indholdet af VS samt opholdstiden i gyllebeholderen. Igen vil det være et problem at fordele metandannelsen på gylle og affald. Lave temperaturer i gyllebeholderen kan dog minimere produktionen af metan.

### 1.2.12 Brug af gødningsvæske

Ved brug af gødningsvæsken tilbageføres vigtige næringsstoffer til landbrugsjorden, bl.a. N, P og K. Desuden indeholder gødningsvæsken miljøfremmede stoffer som f.eks. tungmetaller og plastblødgørere. Det antages, at der ikke er nogen produktion af metan fra gødningsvæsken efter den er udlagt på landbrugsjorden, da der antages aerobe forhold på jorden. Ved brug af gødningsvæsken på landbrugsjorden substitueres handelsgødning. Den substituerede mængde handelsgødning skal udregnes på baggrund af indholdet af næringsalte, som findes i gødningsvæsken.

### 1.2.13 Forbrænding af rejekt samt af fiberfraktion

Forbrænding af restfraktioner er vigtig at inkludere i forhold til energibalancen, da der udvindes betydelig energi fra den ikke bioforgasningsegkede del samt af en eventuel fiberfraktion. Energiudbyttet ved forbrænding af disse fraktioner er især afhængig af vandindholdet, hvorfor det er vigtigt i forhold til et godt energiregnskab, at forbehandlingen og eftersepareringen producerer restfraktioner med et lav vandindhold. Affaldsforbrænding er en velkendt teknologi og beregning af energiudbytte i form af el og varme kan forholdsvis præcist beregnes ud fra affaldets nedre brændværdi og anlæggets virkningsgrader for el- og varmeproduktion. Affaldets nedre brændværdi bestemmes ud fra den nedre brændværdi af tørstofindholdet kombineret med vandindholdet og fordampningsvarmen af vand. Alternativt kan den nedre brændværdi bestemmes ud fra affaldets indhold af vand, aske, C, H, N, S og O

## 1.2.14 Transporter

Ved bioforgasning opstår der transporter udover selve indsamlingen af det kildesorterede dagrenovation. Typisk anlægges forbehandlingsanlægget på eller i nærheden af forbrændingsanlægget, eller på selve biogasanlægget. Der vil derfor være transporter med forbehandlet affald fra forbehandlingsanlægget til biogasanlægget, eller der vil være transporter af rejekt fra forbehandlingsanlægget til forbrændingsanlægget. Derudover vil der være transporter af bundfald og flydestof fra blandingstanken til enten deponi eller forbrænding. Gødningsfraktionen, som opstår efter endt bioforgasning, føres normalt ud til landbrugene, og her kræves endnu en transport af gødningsvæsken og eventuelt af fiberfraktionen, som kan føres til forbrænding eller landbrugsjord.

## 1.3 Modelling af bioforgasning

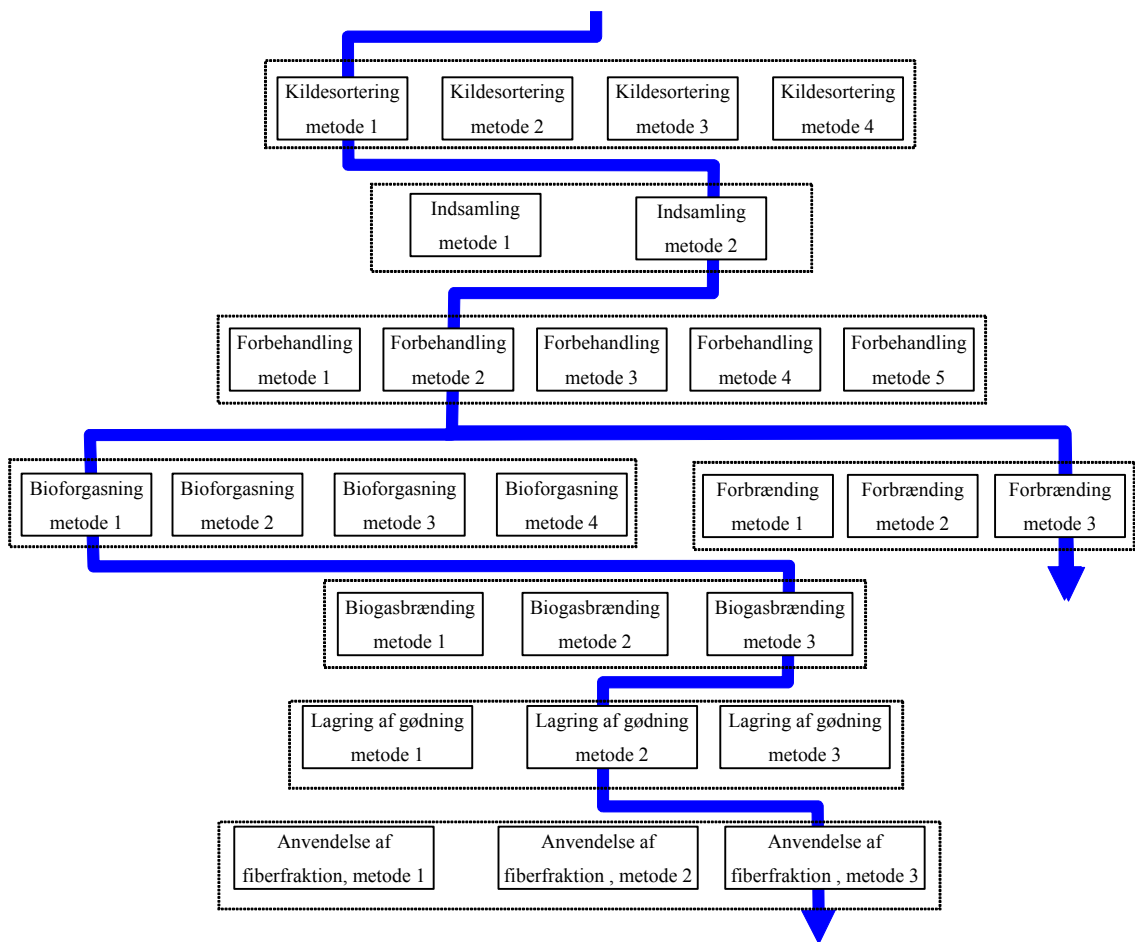
### 1.3.1 Modelafgrænsning

Modelling af biogasproduktionen for kildesorteret organisk dagrenovation indeholder følgende procestrin:

- Kildesortering
- Indsamling
- Forbehandling
- Biogasanlæg inkl. hygiejnisering og evt. med efterseparering
- Forbrænding af biogas
- Efterlagring af gødningsvæske
- Forbrænding af rejekt og evt. fiberfraktion
- Anvendelse af gødningsvæske og evt. fiberfraktion
- Transport af rejekter og andre restprodukter

Der eksisterer flere metoder for hver delproces, som alle har indflydelse på materialestrømmen og den udvundne energi fra systemet. Modellen indeholder derfor flere forskellige metoder til kildesortering, forbehandling, bioforgasning, efterlagring af gødningsvæske og forbrænding. Nogle af delprocesserne ses på Figur 1-2, som viser kompleksiteten og mulighederne for metodevalgene igennem hele systemet. Formålet med modellen er at kunne beregne energi, massestrømme på næringssalte og emissioner af drivhusgasser for alle metodevalg for kildesortering, indsamling, forbehandling, bioforgasning, biogasaftbrænding, efterlagring af gødningsvæske og forbrænding af rejekt, samt for transporter imellem anlæg. Appendiks A viser grafisk afgrænsningen for modellen, og hvor der kan opstå forbrug og produktion af energi samt emissioner af drivhusgasser.

Modellen er opbygget på baggrund af data fra eksisterende delprocesser, og derfor har hver metode et navn, som refererer til den pågældende proces. Det er dog muligt at ændre og tilføje nye metoder, således enhver beskrevet metode kan bruges i modellen. Det er endvidere muligt at ændre virkningsgrader og andre inputparametre for delprocesser, således at modellen på en enkel måde kan tilpasses andre procesforhold end oprindeligt forudsat, ligesom biogassystemernes følsomhed overfor ændringer i inputparametre og andre forudsætninger kan undersøges på enkel måde. Modellen giver dermed også mulighed for at undersøge effekten af ændringer i delprocesser, f.eks. som følge af optimering eller nyudvikling.



Figur 1-2: Procesdiagram i model af biogasproduktion (ikke fuldendt og kun som eksempel)

### 1.3.2 System

Modellen til beregning af energi, emission af drivhusgasser og næringsalte er udført i Excel med følgende regneark:

- *Inddata, niveau 1*
- *Niv. 2.1, Affaldsdata, input*
- *Ber.2.1, Affaldsdata, afledte*
- *Ber.2.2, Indsamling*
- *Niv. 2.3, Forbehandling*
- *Ber.2.3, Forbehandling*
- *Niv. 2.4.1, Biogasanlæg*
- *Niv. 2.4.2, Energianlæg*
- *Ber.2.4, Biogas*
- *Niv. 2.5, Anvend. fiberfraktion*
- *Niv.2.6, Forbrænding*
- *Ber.2.6, Forbrænding*
- *Niv.2.7, Lagr.gødn.væske*
- *Ber.2.7, Lagr.gødn.væske*
- *Ber. Transport*
- *Forudsætninger.niveau 2*
- *Massestrømme*
- *Energistrømme*
- *CO2-strømme*
- *Resultat oversigt*
- *Forudsætninger.niveau 3*

- *Forudsætninger.niv3.1*
- *Forudsætning. niveau 4*
- *Forudsætninger.niveau 4.1*

Arkene er i rækkefølge som affaldets bliver ført igennem affaldssystemet. ”Inddata, niveau1” er inputsiden for bruger, og her defineres affaldsmængder, affaldstyper og teknologier for behandling og indsamling, samt transportafstande mellem anlæg. Ark, hvor navnet inkluderer ”Niv.” definerer metoder for hver delproces med nødvendige parametre, og ark med navn ”Ber.” er beregninger for den gældende metode indenfor delprocessen. Resultaterne fremkommer i ark ”Massestrømme”, ”Energistrømme” og ”CO<sub>2</sub>-strømme”. Arket ”Resultat oversigt” inkluderer en oversigt over energi og CO<sub>2</sub>-strømme af forskellige affaldstyper behandlet på forskellige forbehandlinger. Generelle forudsætninger for systemet defineres i ark med navn ”Forudsætning”.

Nummereringen indikerer hvilket niveau der er tale om, hvor Niveau 1 er det almene brugerniveau med input data, Niveau 2 er for brugere med kendskab til affaldssammensætninger og/eller behandlingsteknologier, hvor der kan ændres parametre, Niveau 3 er hvis fysisk/kemiske parametre skal ændre værdi og Niveau 4 for ændring af selve modellens struktur. På det almene brugerniveau anvendes metoder, som er prædefineret i modellen. Brugeren skal således kun tage stilling til metodevalg og ikke de nærmere parametre, som ligger til grund for metoderne. Dette kan gøres på brugerniveau 2, hvis der ønskes en ændret affaldssammensætning eller andre tekniske parametre for en delproces.

I Appendiks B ses alle metodevalgene og navngivningen af hver enkelt.

I de efterfølgende afsnit beskrives hver enkelt delproces i biogas- og affaldssystemet, som de er modelleret i DTU Biogasmodellen, samt de valg og muligheder brugeren af modellen har. I modellen er alle felter givet en farve, som refererer til usikkerheden på værdierne, eller om værdier er overført data fra andet ark eller beregninger, Tabel 1-1. Denne farvekode anvendes ikke i nærværende rapport.

Tabel 1-1: Farvekode i model (kan ikke ses i sort/hvid print)

Gul:	Input data
Grøn:	Sikre data for metode
Lys gul:	Usikre data for metode
Rød:	Meget usikre data for metode
Lys blå:	Overført data fra andet ark
Blå	Beregnet data

Alle tabeller og figurer efterfølgende har kun til formål at illustrere anvendelsen af modellen og typen af resultater, som fås heraf. ALLE værdier i tabeller figurer bør derfor IKKE regnes som resultat og bør derfor IKKE vurderes på nogen måde.

### 1.3.3 Inddata

Som bruger defineres mængden af organisk kildesorteret dagrenovation, som skal behandles på biogasanlæg samt andet biomasse, som skal biologisk behandles sammen med organisk dagrenovation. Det kan være gylle, spildevandsslam eller affald fra et slagteri, som samrådes med organisk dagrenovation, men disse affaldstyper er ikke defineret på forhånd. Affaldstyperne ”affald 1” til ”affald 10” henviser til affaldstyper, som samrådes med kildesorteret organisk dagrenovation,

og da de ikke er prædefinerede, skal de derfor defineres af brugeren. Derudover kan der defineres mængden af kildesorteret organisk affald, som skal til forbrænding, som alternativ til bioforgasning, samt muligheden for at føre en delstrøm af det organiske dagrenovation, ”Grøn restfraktion”, eventuelt med en anden kemisk sammensætning, direkte til forbrænding. Mængderne indtastes som set i Tabel 1-2. Modellen kan godt håndtere og beregne, at kun organisk kildesorteret dagrenovation bliver bioforgasset på trods af, at det ikke forekommer i virkeligheden.

Tabel 1-2: Input af affaldsmængder

Affaldstype	enhed	navn	mængde
Organisk fraktion til bioforgasning	kg	mass_gf	900
Organisk fraktion direkte til forbrænding	kg	mass_inc	0
Grøn restfraktion til forbrænding	kg	mass_inc_gr	100
affald 1	kg	mass_a1	0
affald 2	kg	mass_a2	0
affald 3	kg	mass_a3	0
affald 4	kg	mass_a4	0
affald 5	kg	mass_a5	0
affald 6	kg	mass_a6	0
affald 7	kg	mass_a7	0
affald 8	kg	mass_a8	0
affald 9	kg	mass_a9	0
affald 10	kg	mass_a10	0

Derefter skal brugeren indtaste den type affald der skal vurderes (Hovedstaden, Kolding, Vejle, Ålborg eller Grindsted) samt de teknologier, der skal anvendes, Tabel 1-3. Dette gøres ved indtastning af talkoder, som refererer til den givne affaldstype/teknologi, som ses i . Der skal af brugeren vælges metode til forbehandling, biogasanlæg, energianlæg til udnyttelse af biogas, forbrændingsanlæg, efterlagring af gødningsvæske, anvendelse af en eventuel fiberfraktion, typen af indsamlingsområde, transport og allokering af energi mellem el- og fjernvarmeproduktion. Indtastes ingen værdi i Tabel 1-3 vælges automatisk en normalmetode (defaultmetode). Teknologierne beskrives i afsnit 1.3.6.

Tabel 1-3: Input for affaldstyper og metodevalg

<b>VÆLG METODER FOR DELPROCESSER I SYSTEMET I DE GULE FELTER:</b>			
Indtast metode for organisk fraktion	4	Kildesortering som i Ålborg plasticposer	Kildesortering, Metode 4
Indtast forbehandling	2	Hydraulisk skruepresse	Forbehandling, Metode 2
Indtast biogasanlæg	2	Herning, termofil, ingen efterseparering	Biogasanlæg, Metode 2
Indtast biogas-energianlæg	2	Herning, el+varme	Energianlæg, Metode 2
Indtast forbrændinganlæg	2	Varmtvands anlæg	Forbrændingsanlæg, Metode 2
Indtast lagring	2	Lagring med låg og opsamling og afbrænding af gasser	Lagring af gødningsvæske, Metode 2
Indtast anvendelse af fiberfraktion	1	Anvendelse på mark	Anvendelse af fiberfraktion, Metode 1
Indtast indsamlingsområde		Blandet bebyggelse	Indsamling, Default
Indtast transport metode		Default transportmetode	Transport, Default
Indtast allokering af energiproduktion		Exergimetoden	Miljødeklaration, Default

Tabel 1-4: Input valg for affaldstyper og behandlingsteknologier

	INDSØGNINGS- MÅLE	ANLÆG	TEKNOLOGI	ANLÆG	TEKNOLOGI	ANLÆG	TEKNOLOGI	ANLÆG	TEKNOLOGI
1	Faldstøtningssortering Faldstøtning	Chinditstrøelse effortering	Gårdsdæld	Isfaldstøtning	Årskøring	Årskøring	Årskøring	Årskøring	Årskøring
2	Faldstøtningssortering Faldstøtning	Faldstøtning Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning
3	Faldstøtningssortering Faldstøtning	Faldstøtning Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning
4	Faldstøtningssortering Faldstøtning	Faldstøtning Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning
5	Faldstøtningssortering Faldstøtning	Faldstøtning Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning
6	Faldstøtningssortering Faldstøtning	Faldstøtning Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning	Faldstøtning



Endeligt skal brugeren definere afstande mellem de involverede anlæg, hvor forbeholdt affald eller dele heraf skal transporteres, se Tabel 1-5. Her defineres også afstanden mellem forbehandlingsanlægget, biogasanlægget og forbrændingsanlægget, og derved om forbehandlingsanlægget ligger ved forbrændingsanlægget, ved biogasanlægget eller et tredje sted.

Tabel 1-5: Input af transportafstande

<b>INDTAST TRANSPORT AFSTANDE I DE GULE FELTER:</b>				
<b>TRANSPORT</b>	Fra-til	Mængde	Afstand / km	Navn
Fra forbehandling til biogasanlæg	B-C	C1	0	km_bc
Rejekt fra forbehandling til forbrænding	B-F	F2	25	km_bf
Flydestof mv. fra biogasanlæg til forbrænding	C-F	F3	25	km_cf
Afgasset fast stof til forbrænding (samme afstand som C-F)	D-F	F1	25	km_df
Gødningsvæske fra efterseparering til jordbrug	D-G	G1	10	km_dg
Afgasset fast stof til jordbrug	D-I	I1	12	km_di
Bundfald til deponering	D-K	K1	40	km_dk

#### 1.3.4 Grundlæggende forudsætninger

En mindre database i ark ”*Forudsætninger, niveau 3*” indeholder fysiske konstanter, som anvendes i modellen. Der er givet enheder, kodenavn, som anvendes i modellen samt kilden for værdien. Det drejer sig hovedsageligt om brændværdier, CO<sub>2</sub>-emissioner og massefylder for en række energiressourcer. Desuden findes der data om affaldsgenerering, drivhuspotentiale for metan og energibehov for produktion af næringssalte i handelsgødning. Se Tabel 1-6.

Tabel 1-6: Grundlæggende forudsætninger (Parametre mærket med \* anvendes ej til beregninger)

	Enhed	Værdi	Navn	Bemærkning, kilde
<b>Data for vand</b>				
Fordampningsvarme af vand	GJ/ton	2,45	Hfd.vand	Reel værdi, Hulgård, 2002, personlig kommunikation
Varmekapacitet af vand (væske)*	MJ/ton/°C	4,186	cp.vand	
Massefylde	ton/m <sup>3</sup>	1	rho.vand	
<b>Data for energivarer</b>				
Nedre brændværdi				
Gasolie/dieselolie	GJ/ton	42,7	Hu.olie	Energistatistik 1999
Naturgas	GJ/tusind Nm <sup>3</sup>	39,9	Hu.gas	Energistatistik 1999
Kul	GJ/ton	25	Hu.kul	Energistatistik 1999
Orimulsion	GJ/ton	27,6	Hu.orimulsion	Energistatistik 1999
Affald	GJ/ton	10,4	Hu.affald	Energistatistik 1999
Metan	GJ/tusind Nm <sup>3</sup>	35,91	Hu.metan	Steinmüller Taschenbuch, 25 Auflage, 1992
Metan	GJ/ton	50,01		Steinmüller Taschenbuch, 25 Auflage, 1992
<b>CO2-emissioner (kg CO2)</b>				
Gasolie/dieselolie	kg/GJ	74	CO2.olie	Energistatistik 1999
Naturgas	kg/GJ	56,9	CO2.gas	Energistatistik 1999
Biogas	kg/GJ	0	CO2.biogas	Energistatistik 1999
Affald	kg/GJ	0	CO2.affald	Energistatistik 1999
Metan	kg/Nm <sup>3</sup>	20	CO2.methan	(CO2 neutral, baseret på 100 årig tidshorizont)
<b>Massefylder</b>				
Gasolie/dieselolie	ton/m <sup>3</sup>	0,84	rho.olie	Energistatistik 1999
Naturgas	ton/tusind Nm <sup>3</sup>			
Metan, CH4	ton/tusind Nm <sup>3</sup>	0,718	rho.metan	Steinmüller Taschenbuch, 25 Auflage, 1992
Kuldioxid, CO2	ton/tusind Nm <sup>3</sup>	1,977	rho.co2	Steinmüller Taschenbuch, 25 Auflage, 1992
Luft *	ton/tusind Nm <sup>3</sup>	1,293	rho.luft	Steinmüller Taschenbuch, 25 Auflage, 1992
Affaldsgenerering af organisk husholdningsaffald	kg org. affald/pers/år	40	affald.pers	input værdi
Drivhuseffekt-potentialet for metan, CH4:	kg CO2-ækv per kg CH4	25	GWPpot	Hauschild m.fl. 1997
<b>Substitution af gødning</b>				
Andel af N udnyttet på mark	%	60%	subs.andel.N	Tønning m.fl. 1997 (Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen)
Energibehov til produktion af N i handelsgødning	MJ/kg	50	subs.N	Bundgaard, 1993 (Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen)
Energibehov til produktion af P i handelsgødning	MJ/kg	16	subs.P	Bundgaard, 1993 (Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen)
Energibehov til produktion af K i handelsgødning	MJ/kg	8	subs.K	Bundgaard, 1993 (Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen)

### 1.3.5 Affaldskarakterisering

For en mængde organisk affald vælges kildesorteringen ud fra metoderne, der er defineret i modellen. Derved fremkommer den kemiske sammensætning og mængderne af hver parameter i affaldet, som ankommer til forbehandlingsanlægget. Affaldskarakteriseringen er væsentlig både i forhold til

biogasproduktionen, men også for energiproduktionen ved affaldsforbrænding og for massebalancen for næringssalte, som tilbageføres til landbruget. Karakterisering sker for 10 sekundære affaldstyper, som er andet biomasse til samrådning med kildesorteret organisk dagrenovation. Disse fraktioner kan være gylle, slagteriaffald, slam mm., som skal defineres mht. den kemiske sammensætning. Affaldskarakteriseringen er desuden defineret for en række forskellige organiske affaldsfraktioner fra husholdninger ved forskellige kildesorteringsmetoder fra forskellige kommuner. Udover de prædefinerede affaldssammensætninger, er der en ”Grøn restfraktion” samt en ”ledig” kolonne, til senere brug for en ny affaldssammensætning. ”Grøn restfraktion” er en delstrøm af den organiske fraktion, som efter ønske kan føres direkte til forbrænding uden om biogasanlægget. Dette kan gøres for at vurdere, om det kan være fordelagtigt at føre en del af den organiske dagrenovation, eventuelt med en ændret kemisk sammensætning, til forbrænding frem for til bioforgasning. Parametrene og enhederne ses i Tabel 1-7. Derefter foregår der en beregning til totale mængder af hver parameter for den samlede mængde affald, som vurderes i systemet. De i Tabel 1-7 mængder af hver parameter repræsenterer den organiske del af bioaffaldet og ikke fejlsorteringer og plastposer, som er anvendt til indsamling. Årsagen til at plastposer ikke er medtaget er, at de vurderes at blive brændt i et forbrændingsanlæg uanset om der er separat indsamling med henblik på bioforgasning eller om al affald bliver indsamlet til forbrænding.

Tabel 1-7: Affaldskarakterisering af kildesorteret organisk dagrenovation ved forskellige metoder til kildesortering (pt. bliver parametrene for TS, VS, brændværdi, biogaspotentiale, samt næringssaltene N, P og K anvendt til beregningerne, \* anvendes ej).

Affaldstype	Enhed	Grøn rest fraktion	Kildesortering som i København, papirposer	Kildesortering som i Kolding plasticposer	Kildesortering som i Vejle plasticposer	Kildesortering som i Ålborg plasticposer	Kildesortering som i Grindsted papirposer
		Grøn rest fraktion	Kildesortering Metode 1	Kildesortering Metode 2	Kildesortering Metode 3	Kildesortering Metode 4	Kildesortering Metode 5
Tørstofindhold (TS)	%	80,0	29,90	33,6	33,8	31,3	32,3
Glødetab (VS)	% af TS	90,7	90,7	82,8	83,1	85,9	87,9
Nedre brændværdi	MJ/kg TS	19,3	19,3	18,1	18,1	18,5	18,8
COD *	kg/kg VS	1,6	1,6	1,8	1,8	1,7	1,6
Målt biogaspotentiale	L CH4/kg VS	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0
Hovedbestanddele							
C *	% af VS	53,6	53,6	59,6	59,2	57,8	55
H *	% af VS	6,7	6,7	7,5	7,5	7,3	6,9
N	% af VS	3,6	3,6	4	4	3,9	3,8
S *	% af VS	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2
O *	% af VS	35	35	35	35	35	35
Cl *	% af VS	0,5	0,6	0,8	0,6	0,7	0,5
Protein *	% af TS	15,5	15,4	14,9	13,9	15,3	16,1
Fedt *	% af TS	13,6	13,6	13,6	12,3	14,4	15,8
Træstof *	% af TS	19,8	19,7	17,9	19,7	15,8	25,9
EFOS *	% af TS	94,8	94,9	92	87,1	82,2	95,4
P	% af aske	4,4	4,4	2,2	2,3	2,5	3,4
K	% af aske	10,6	10,6	5,4	5,1	5,5	7,3

### 1.3.6 Tekniske specifikationer for delprocesser

For hver enhedsproces (forbehandling, biogasanlæg, gasmotor, affaldsforbrænding og lagring af gødningsvæske) foreligger en tabel over de tekniske specifikationer for hver teknologi. I de følgende afsnit defineres hver enhedsproces.

#### 1.3.6.1 Indsamling

Indsamling af det kildesorterede organiske dagrenovation afhænger af om det skal bioforgasses, hvor der i modellen kræves separat indsamling, eller om affaldet bliver kørt til forbrænding, hvor traditionel indsamling anvendes til beregningerne. Brugeren skal tage stilling til hvilket bebyggelsesområde affaldet bliver indsamlet. Hver bebyggelsesområde har et dieseloliebehov til indsamling i selve indsamlingsområdet givet i liter diesel per ton indsamlet affald. Derudover opstår et dieselforbrug til transporten mellem indsamlingsområdet og behandlingsanlægget. For traditionel indsamling fås dieselforbrug fra en undersøgelse i Århus kommune (Vrgoc m.fl., 2002), og for separat indsamling antages at forbruget af diesel til selve indsamlingen er dobbelt så stor, da der kræves 2 biler der kører samme rute. Det antages, at indsamlingen for organisk kildesorteret dagrenovation har samme effektivitet som traditionel indsamling, men at der ikke er en væsentlig brændstofmæssig besparelse ved ikke at indsamle den organiske fraktion ved traditionel indsamling af dagrenovation. Derfor er antagelsen, at separat indsamling af organisk dagrenovation forbruger den dobbelte mængde brændstof. Bebyggelsestyper og dieselforbrug for indsamling ses i Tabel 1-8, og disse værdier i tabellen kan ændres af brugeren.

Tabel 1-8: Bebyggelsestyper og dieselforbrug for traditionel og separat affaldsindsamling

Type beboelsesområde		Forbrug, l olie per kg	
Metode	Beskrivelse	Traditionel indsamling	Separat indsamling
1	Villa område	3,3 E-03	6,6 E-03
2	Etagebebyggelse	3,3 E-03	6,6 E-03
3	City område	3,3 E-03	6,6 E-03
4	Landområde	7,0 E-03	14 E-03
5	Blandet bebyggelse	4,0 E-03	8,0 E-03

Dieselforbruget til transporten mellem indsamlingsområde og forbehandlingsanlægget og forbrændingsanlægget afhænger dels af den gennemsnitlige afstand og dieselforbruget per km. Herunder er antaget, at en indsamlingsvogn kan køre 3 km/l med en last på 5000 kg affald, hvilket svarer til et forbrug på 0,67 l diesel per ton per km (Teknologisk Institut, 2001).

Tabel 1-9: Indsamlingsparametre til transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg

Transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg		
Afstand til forbehandlingsanlæg	25	km
Afstand til forbrændingsanlæg	15	km
Dieselforbrug under transport	0,67E-04	l/kgkm

Det samlede dieselforbrug er da summen af dieselforbruget for separat indsamling af den del som bioforgasses og af dieselforbruget for traditionel indsamling af den del der køres direkte til forbrænding:

$$\text{tot\_indsamling} = \text{mass\_gf} * (\text{forbrug\_separat} + L_1 / \text{df\_trans}) + (\text{mass\_inc} + \text{mass\_inc\_gr}) * (\text{forbrug\_trad} + L_2 / \text{df\_trans})$$

hvor

- tot\_indsamling: Totale dieselforbrug til indsamling og transport af kildesorteret dagrenovation [l]
- mass\_gf: Organisk fraktion til bioforgasning [kg]
- mass\_inc: Organisk fraktion direkte til forbrænding [kg]
- mass\_inc\_gr: Grøn restfraktion direkte til forbrænding [kg]
- forbrug\_separat: Dieselforbrug til separat indsamling for den valgte bebyggelsestype [l/kg]
- forbrug\_trad: Dieselforbrug til traditionel indsamling for den valgte bebyggelsestype [l/kg]
- L<sub>1</sub>: Gennemsnitlige afstand fra indsamlingsområde til forbehandlingsanlæg [km]
- L<sub>2</sub>: Gennemsnitlige afstand fra indsamlingsområde til forbræningsanlæg [km]
- df\_trans: Dieselforbrug under transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg [l/kgkm]

### 1.3.6.2 Forbehandling

Forbehandlingen beskrives med hensyn til rejktandel, tørstof og VS i både rejkt og det forbehandlede affald til reaktoren. Sigtning på rulsesigte og en hydraulisk presse producerer forskellig sammensætninger af forbehandlede affald til reaktor og rejkt til forbrænding. Forbehandlingen kan desuden afhænge af kildesorteringen, da affaldssammensætningen vil påvirke rejktandelen. Energiforbruget til forbehandlingen skal indgå til den samlede energibalace.

Der foreligger på nuværende tidspunkt 2 forbehandlingsteknologier defineret i modellen: En rulsesigte og en hydraulisk skruepresse. For de 2 teknologier er angivet effektforsøg per ton affald, se Tabel 1-10.

Tabel 1-10: Tekniske specifikationer for forbehandling

Forbehandling		Rulsesigte	Hydraulisk skruepresse	Forbehandling 3	Forbehandling 4	Forbehandling 5	Forbehandling 6
		Forbehandling, Metode 1	Forbehandling, Metode 2	Forbehandling, Metode 3	Forbehandling, Metode 4	Forbehandling, Metode 5	Forbehandling, Default
Elforbrug	kwh/ton	15	11	11	11	11	15
Olieforbrug	l/ton	0	0	0	0	0	0

Næste trin i beregningerne er fordelingen af det kildesorterede dagrenovation i mellem forbehandlede kildesorterede dagrenovation til biogasanlægget og til rejkt til forbrænding. De to teknologier har forskellig resultat med hensyn til hvad der separeres fra. Ved at analysere det forbehandlede affald og rejkt er det muligt at beregne sig til fordelingen mellem rejkt og affald til bioforgasning for hver enkelt parameter i affaldet. Der er derfor udformet en matrix for hver forbehandlingsteknologi, som angiver for hver affaldssammensætning andelen, X, af hver parameter som føres som forbehandlede affald videre til biogasanlægget. Den resterende mængde af parameteren (1-X) føres således som rejkt til forbrænding. Herved findes den fordelingsnøgle i ark "Niv. 2.2, Forudsætninger" som er indtastet for netop den kombination af affaldstype og forbehandling, se

Tabel 1-11. Nøglen, som består af værdier mellem 0 og 1, refererer værdierne til den andel af den pågældende parameter, som føres videre til biogasanlægget. Denne hentes ind i ark "Ber.2.2, Forbehandling". Affaldssammensætningen for den samlede kildesorterede dagrenovation hentes og multipliceres med den hentede

fordelingsnøgle. Herved fås mængder og sammensætning for forbehandlet kildesorteret affald til biogasanlægget og for rejekt til forbrænding, Tabel 1-12. Fordelingen er beregnet på den organiske del af det indsamlede affald og tager ikke hensyn til eventuelle plastposer, som er anvendt til indsamling. Der foreligger på nuværende tidspunkt ingen fordeling af affald indsamlet i Grindsted forbehandlet på ruller eller skruepresse, da der ikke er foretaget forsøg på denne kombination.

Tabel 1-11: Fordeling af kildesorteret dagrenovation til forbehandlet kildesorteret dagrenovation og rejekt ved hydraulisk skruepresse og rullsigte (\* markerer parametre som ikke anvendes til beregninger)

<b>Rullesigte</b>				
Forbehandling, Metode 1	Organisk fraktion, Kildesortering som i København, papirposer	Organisk fraktion, Kildesortering som i Kolding plasticposer	Organisk fraktion, Kildesortering som i Vejle plasticposer	Organisk fraktion, Kildesortering som i Ålborg plasticposer
Tørstofindhold (TS)	0,63	0,54	0,63	0,55
H2O	0,73	0,66	0,76	0,82
Glødetab (VS)	0,624	0,531	0,622	0,542
COD *	0,612	0,641	0,508	0,576
Hovedbestanddele				
C *	0,634	0,545	0,633	0,538
H *	0,64	0,545	0,634	0,536
N	0,667	0,561	0,665	0,532
S *	0,627	0,531	0,622	0,542
O *	0,62	0,46	0,56	0,42
Cl *	0,544	0,531	0,622	0,542
Protein *	0,656	0,531	0,622	0,542
Fedt *	0,656	0,531	0,622	0,542
Træstof *	0,565	0,531	0,622	0,542
EFOS *	0,635	0,531	0,622	0,542
P	0,677	0,662	0,696	0,662
K	0,647	0,575	0,65	0,562
Størrelsesfordeling				
>1 cm *	-	-	-	-
>5 cm *	-	-	-	-
<b>Hydraulisk skruepresse</b>				
Forbehandling, Metode 2	Organisk fraktion, Kildesortering som i København, papirposer	Organisk fraktion, Kildesortering som i Kolding plasticposer	Organisk fraktion, Kildesortering som i Vejle plasticposer	Organisk fraktion, Kildesortering som i Ålborg plasticposer
Tørstofindhold (TS)	0,53	0,54	0,46	0,52
H2O	0,57	0,68	0,63	0,7
Glødetab (VS)	0,538	0,549	0,477	0,528
COD *	0,579	0,329	0,343	0,596
Hovedbestanddele				
C *	0,55	0,55	0,472	0,527
H *	0,557	0,557	0,476	0,535
N	0,575	0,583	0,488	0,541
S *	0,538	0,549	0,477	0,528
O *	0,538	0,549	0,477	0,528
Cl *	0,538	0,549	0,477	0,528
Protein *	0,538	0,549	0,477	0,528
Fedt *	0,538	0,549	0,477	0,528
Træstof *	0,538	0,549	0,477	0,528
EFOS *	0,538	0,549	0,477	0,528
P	0,392	0,483	0,37	0,433
K	0,553	0,612	0,538	0,594
Størrelsesfordeling				
>1 cm *	-	-	-	-
>5 cm *	-	-	-	-

Tabel 1-12: Beregning af affaldsparametre til rejekt og forbehandlet affald ud fra en given affaldssammensætning og forbehandlingsmetode ( parametre som ikke anvendes til beregninger)

<b>Fordeling mellem rejekt og forbehandlet affald</b>	Enhed	Affalds-sammensætning	til biogasreaktor	til rejekt
Tørstofindhold (TS)	kg	269,1	142,6	126,5
H <sub>2</sub> O	kg	630,9	359,6	271,3
Glødetab (VS)	kg	244,1	131,3	112,8
Brændværdi, tør askefri	MJ/kg VS	22,9	22,9	22,9
COD *	kg	4,2	2,4	1,8
biogaspotentiale	l/kg VS	450,0	450,0	450,0
<b>Hovedbestanddele</b>				
C *	kg	130,8	72,0	58,9
H *	kg	16,4	9,1	7,2
N	kg	8,8	5,1	3,7
S *	kg	0,5	0,3	0,2
O *	kg	85,4	46,0	39,5
Cl *	kg	1,5	0,8	0,7
Protein *	kg	41,4	22,3	19,1
Fedt *	kg	36,6	19,7	16,9
Træstof *	kg	53,0	28,5	24,5
EFOS *	kg	255,4	137,4	118,0
P	kg	1,1	0,4	0,7
K	kg	2,7	1,5	1,2
<b>Størrelsesfordeling</b>				
>1 cm *	kg	0,0	0,0	0,0
>5 cm *	kg	0,0	0,0	0,0
<b>Total vægt</b>	<b>kg</b>	<b>900,0</b>	<b>502,2</b>	<b>397,8</b>

### 1.3.6.3 Biogasanlæg

Biogasanlæg kan i kraft af forskellige processer og systemer have forskellige effektforbrug og forskellige effektivitet mht. nedbrydning af organisk materiale. Forskellene kan skyldes opholdstider, temperaturer, pumpningsbehov og eftersepareringsmetoder, som alle kan være forskellige fra anlæg til anlæg. Vigtige specifikationer ved et biogasanlæg i denne sammenhæng er først og fremmest nedbrydningseffektiviteten beskrevet ved andel af glødetab som omsættes i det pågældende biogasanlæg. Denne effektivitet inkluderer det bidrag, som opstår ved en efterlagring på selve biogasanlægget. Andre specifikationer er effektforbruget (inkl. effektforbruget til eventuel efterseparering), hvor forbruget af varme beregnes på baggrund af opvarmning af affaldet til en given temperatur, opholdstid samt et sikkerhedstillæg. Desuden defineres mængden af bundfald samt flydestof, som dannes i biogasanlægget.

Hvis der sker en efterseparering, defineres andelen af våd vægt til fiberfraktionen samt tørstofindholdet i samme. Modellen beregner således andelen til gødningsvæsken, både på våd vægt samt på tørstof basis.



Tabel 1-13: Tekniske specifikationer for biogasanlæg (bemærk opholdstiden for affaldet i reaktoren anvendes ikke pt. til beregninger i modellen)

<b>Biogasanlæg</b>		Default biogasanlæg	Grindsted, mesofil, efterseparering	Herning, termofil, ingen efterseparering	Vaarst-Fjellerad, termofil, ingen efterseparering	Biogasanlæg 4	Biogas-anlæg 5
		Biogasanlæg, Default	Biogasanlæg, Metode 1	Biogasanlæg, Metode 2	Biogasanlæg, Metode 3	Biogasanlæg, Metode 4	Biogasanlæg, Metode 5
Glødetab omsat	%	75	75	75	75	75	75
Egetforbrug af el	kWh/ton	25	25	25	20	35	35
Egetforbrug af varme	GJ/ton	0.21	0,12	0,22	0,22	0,17	0,17
Opvarmning af affald	°C	55	37	55	55	45	45
Sikkerhedstillæg af hensyn til varmetab	%	10	10	15	15	15	15
Opholdstid i reaktor *	dage	20	20	15	15	21	21
Bundfald	%	1	0,75	0,5	1	2	2
Flydestof mv.	%	1	1	0.5	0.5	0	2
<b>Efterseparering</b>							
Andel til fiberfraktion, VV	%	0	35	0	0	40	25
Tørstof i fiberfraktion	% TS	0	50	0	0	74	75
Andel til gødningsvæske, VV	%	100	65	100	100	60	75

Beregning af biogasproduktion og energi fra biogas findes i ark "Ber.2.4,Biogas", hvorfra der hentes teknologier for biogasanlægget fra ark "Niv. 2.3, Biogasanlægsdata" og for biogasmotoren fra ark " Niv. 2.4, Energianlæg". Mængden af bundfald og flydestof beregnes, og her antages at lige dele af substanserne føres fra anlægget.

Tabel 1-14: Beregning af bundfald og flydestof fra biogasanlægget (parametre mærket med \* anvendes ikke til beregninger)

BEREGNING AF BUNDFALD OG FLYDESTOF				
Input til biogasanlæg		IND	UD	
Parametre	Enhed	Organisk fraktion	Bundfald, 0,5%	Flydestof mv., 0,5 %
Tørstofindhold (TS)	kg	142,62	0,71	0,71
H <sub>2</sub> O	kg	359,61	1,80	1,80
Glødetab (VS)	kg	131,31	0,66	0,66
COD *	kg	2,42	0,01	0,01
Hovedbestanddele				
C *	kg	71,95	0,36	0,36
H *	kg	9,11	0,05	0,05
N	kg	5,05	0,03	0,03
S *	kg	0,26	0,00	0,00
O *	kg	45,96	0,23	0,23
Cl *	kg	0,79	0,00	0,00
Protein *	kg	22,30	0,11	0,11
Fedt *	kg	19,69	0,10	0,10
Træstof *	kg	28,52	0,14	0,14
EFOS *	kg	137,39	0,69	0,69
P	kg	0,43	0,00	0,00
K	kg	1,47	0,01	0,01
Størrelsesfordeling				
>1 cm *	kg	0,00	0,00	0,00
>5 cm *	kg	0,00	0,00	0,00
Ialt	kg	502,24	2,51	2,51

Metanproduktionen beregnes ud fra glødetabet i affaldet (kg VS), den potentielle metandannelse defineret i ark "Niv. 2.1, Affaldsdata, input" (normal liter per kg VS) og nedbrydningsgraden af VS i % defineret i ark "Tekniske specifikationer for biogasanlæg":

$$V_{CH_4} = m_{VS} * P_{CH_4} * \epsilon_{VS}$$

hvor

$V_{CH_4}$  : Volumen af metan [l]

$m_{VS}$  : Mængden i kg VS i forbehandlet kildesorteret organisk dagrenovation [kg]

$P_{CH_4}$  : Potentialet for metandannelse per kg VS [l CH<sub>4</sub>/kg VS]

$\epsilon_{VS}$  : Nedbrydningsgraden af VS i biogasanlægget [-]

Tabel 1-15 viser strømmene ud fra biogasanlægget. Væsentlige strømme til videre beregninger er:

- Uforbrændt metan fra motoren
- Gasmængden til biogasmotoren
- Tørstofmængden ud
- Vand ud
- Mængder og TS i gødningsvæske
- Mængder og TS i en eventuel. fiberfraktion

Output fra biogasanlægget beregnes, først ved beregning af massen af den producerede biogas ud fra en antagelse om en metanprocent, hvorefter tørstof, vand og gødningsvæsken bliver beregnet.

Massen af biogassen beregnes vha. idealgasligningen, som indebærer, at ved 20 C og et atmosfæres tryk fylder et mol ideal gas 24 liter. Biogassen antages at bestå af metan (CH<sub>4</sub>) med en volumenprocent defineret i ark ”Niv. 2.4.2, *Energianlæg*” og kuldioxid (CO<sub>2</sub>).

Mængden af uforbrændt metan beregnes på baggrund af volumen af metan produceret og andelen af metan som går uforbrændt gennem gasmotoren.

$$E_{\text{uforbrændtCH}_4} = V_{\text{CH}_4} * a_{\text{uforbrændtCH}_4} * \frac{M_{\text{CH}_4}}{\text{Vol}_{\text{gas}}}$$

Massen af den producerede biogas beregnes vha. metanprocenten i gassen fra Tabel 1-16:

$$m_{\text{biogas}} = \frac{V_{\text{CH}_4} * M_{\text{CH}_4} + V_{\text{CH}_4} \left( \frac{1}{a_{\text{CH}_4}} - 1 \right) * M_{\text{CO}_2}}{\text{Vol}_{\text{gas}}}$$

Tørstofmængden ud af biogasanlægget beregnes som differencen mellem tørstoftilførslen til biogasreaktoren og massen af biogas:

$$m_{\text{TS-ud}} = m_{\text{TS-cvind}} - m_{\text{biogas}}$$

hvor

$V_{\text{CH}_4}$ :	Volumen af metan produceret [m <sup>3</sup> ]
$E_{\text{uforbrændtCH}_4}$ :	Emission af uforbrændt metan [kg]
$a_{\text{uforbrændtCH}_4}$ :	Andelen af uforbrændt metan [%]
$M_{\text{CH}_4}$ :	Molvægten af metan [0,016 kg/mol]
$M_{\text{CO}_2}$ :	Molvægten af CO <sub>2</sub> [0,044 kg/mol]
$\text{Vol}_{\text{gas}}$ :	Volumen af 1 mol idealgas [m <sup>3</sup> /mol]
$a_{\text{CH}_4}$ :	Andelen af metan i biogas [-]

Forekommer efterseparering ikke føres den resterende mængde, som var tilført biogasreaktoren, til gødningsvæsken. Sker der derimod en efterseparering, hvor der dannes en relativ tør fiberfraktion og en flydende gødningsvæske, beregnes indholdet af TS i de to fraktioner ud fra brugerdefinerede værdier om masseandelen og tørstofindhold i fiberfraktionen, Tabel 1-13 . Det skal dog pointeres, at på nuværende tidspunkt er det uklart hvorledes næringssaltene fordeler sig mellem fiberfraktionen og gødningsvæsken, hvorfor gødningsværdien af disse fraktioner er usikker. På denne baggrund beregner modellen ikke på næringssaltene, hvis der er valgt en metode på biogasanlægget, som inkluderer en efterseparering af gødningsvæsken.

Tabel 1-15: Udgående strømme fra biogasanlæg

<b>Output beregninger fra biogas-anlæg</b>	Enhed	Værdi
Metan emission	kg	0,88
Biogasmængde	kg	72,56
Tørstof ud	kg	68,64
Vand ud	kg	356,02
Sum ud	kg	424,65
Gødningsvæske, vv	kg	424,7
Fiberfraktion, vv	kg	0,0
Fiberfraktion, tør vægt	kg TS	0,0
Gødningsvæske, tør vægt	kg TS	68,6
TS i gødningsvæske	%	16,2
TS i Fiberfraktion	%	0,0

#### 1.3.6.4 Biogasmotor (energianlæg)

Biogassen kan anvendes til elproduktion alene eller til kombineret el- og fjernvarmeproduktion. Typisk er energieffektiviteten højere ved en kombineret el- og fjernvarmeproduktion, men er biogasmotoren placeret evt. på biogasanlægget langt fra potentielle fjernvarmebrugere, udnyttes varmen ikke altid, eller måske kun til internt brug, hovedsageligt til hygiejnisering af affaldet. Der skal derfor defineres en samlet energivirkningsgrad i gasmotoren samt en elvirkningsgrad på samme. Modellen beregner deraf varmeevirkningsgraden som forskellen på de 2 ovennævnte værdier. Desuden defineres udslippet af uforbrændt metan fra motoren, da dette metanudslip kan være et væsentlig bidrag til drivhuseffekten. Værdien er som udgangspunkt sat til 3 %, som er en ikke overvurderet værdi (de Wit m.fl., 1998). Desuden angives metanprocenten i biogassen til senere beregning af det ”vægttab”, der forekommer ved den producerede biogas. Volumenprocenten er sat til 65 %, se Tabel 1-16.

Tabel 1-16: Tekniske specifikationer for gasmotor

<b>Biogasmotor</b>		Default energianlæg	Grindsted, el Energianlæg, Metode 1	Herning, el+varme Energianlæg, Metode 2	Vaarst-Fjellerad, el+varme Energianlæg, Metode 3
	Enhed	Metode, default			
Energivirkningsgrad ved forbrænding	%	85	40	85	85
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	38	40	38	38
Varmevirkningsgrad (af indfyret)	%	47	0	47	47
Metanudslip fra motor	% af metan	3	3	3	3
Metanprocent i biogas	%	65	65	65	65

Energien i den producerede metan beregnes vha. brændværdien, *hu.metan*. På baggrund af denne værdi samt energi- og elvirkningsgraden for biogasmotoren beregnes den producerede mængde elektricitet og fjernvarme. De samlede energibetragninger fra biogasanlægget ses i Tabel 1-17.

$$E_{\text{el-prod}} = V_{\text{CH}_4} * \text{hu.metan} * \epsilon_{\text{el}} - m_{\text{fkd}} * F_{\text{el}}$$

hvor

$E_{\text{el-prod}}$  : Netto elproduktion [MJ]

$V_{\text{CH}_4}$  : Volumen af metan produceret [ $\text{Nm}^3$ ]

hu.metan : Metans brændværdi [ $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ]

$\epsilon_{\text{el}}$  : Elvirkningsgrad i biogasmotor [%]

$m_{\text{fkd}}$  : Massen af forbehandlet kildesorteret dagrenovation [kg]

$F_{\text{el}}$  : Egetforbrug af el på biogasanlægget [ $\text{MJ}/\text{kg}$ ]

For varmeproduktionen:

$$E_{\text{el-varme}} = V_{\text{CH}_4} * \text{hu.metan} * \epsilon_{\text{varme}} - m_{\text{fkd}} * F_{\text{varme}}$$

hvor

$E_{\text{el-varme}}$  : Netto varmeproduktion [MJ]

$\epsilon_{\text{varme}}$  : Varmevirkningsgrad i biogasmotor [-]

$F_{\text{varme}}$  : Egetforbrug af varme på biogasanlægget [ $\text{MJ}/\text{kg}$ ]

Tabel 1-17: Energiberegninger ved biogasanlægget

<b>Energiberegninger for systemet</b>	Enhed	Værdi
Energi ind	MJ	1575
Energi ud, brutto	MJ	1339
El ud, brutto	MJ	599
Varme ud, brutto	MJ	740
El forbrug på anlæg	MJ	45
Varme forbrug på anlæg	MJ	108
Netto el ud	MJ	554
Netto varme ud	MJ	633

#### 1.3.6.5 Lagringsmetoder til gødningsvæske

Efterlagring af gødningsvæske er en potentiel kilde til øget drivhuseffekt, da den biologiske nedbrydning meget sjældent er bragt til ende ved selve bioforgasning i biogasanlægget. Derfor er det væsentligt om der sker en opsamling af metan ved efterlagring eller om efterlagringen sker uden "låg", således metan kan slippe frit ud til atmosfæren. Ved opsamling forventes ikke en udnyttelse af gassen, da denne efterlagring sker hos brugerne af gødningsvæsken, som typisk vil være de nærliggende landmænd. Dog må det forventes, at der sker en afbrænding af metanet, således den og andre flygtige organiske stoffer forbrændes. Der er 3 metodevalg til efterlagring af gødningsvæske indeholdt i modellen: Åben lagring, lagring med opsamling og afbrænding, samt et default alternativ, som kan justeres efter brugerens behov, Tabel 1-18.

Tabel 1-18: Tekniske specifikationer for efterlagring af gødningsvæske (Bemærk, kun omsætningsgraden af potentiel produktion og om afbrænding af metan anvendes i de videre beregninger, areal af tank beregnes; \* anvendes parametre ikke til beregninger)

Efterlagring af gødningsvæske	Enhed	Åben lagring	Lagring med låg og opsamling og afbrænding af gasser	Default lagring af gødningsvæske
		Lagring, Metode 1	Lagring, Metode 2	Lagring, Default
Temperatur i tank *	°C	15	13	12
Volumen af tank *	m3	200	150	200
Højde af tank *	m	3,5	3	2,5
Areal af tank *	m2	57	50	80
Omsætningsgrad af potentiel produktion	%	8	8	8
Opholdstid i tank *	dage	145	180	270
Afbrænding af metan *	-	nej	ja	ja

De to parametre som definerer emissionen af metan, er omsætningsgraden (%) af det tilbageværende glødetab i gødningsvæsken, samt om gassen fra efterlagring opsamles, og afbrændes eller om der er åben lagring med fri emission af metan.

Volumen af den potentielle metan dannelse ved efterlagring:

$$\text{Vol.CH4}_{\text{pot-el}} = m_{\text{VS-el}} * P_{\text{CH4}}$$

Massen af den aktuelle metanproduktion:

$$m.\text{CH4}_{\text{akt-el}} = \text{Vol.CH4}_{\text{pot-el}} * \varepsilon_{\text{VS-el}} * M_{\text{CH4}}/\text{Vol}_{\text{gas}}$$

hvor

Vol.CH4 <sub>pot-el</sub> :	Metandannelsespotentialen ved efterlagring [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]
m <sub>VS-el</sub> :	Massen af glødetab til efterlagring [kg VS]
P <sub>CH4</sub> :	Potentialet for metandannelse per kg VS [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg VS]
m.CH4 <sub>akt-el</sub> :	Massen af metan dannelse ved efterlagring [kg CH <sub>4</sub> ]
ε <sub>VS-el</sub> :	Glødetab omsat under efterlagring [%]
M <sub>CH4</sub> :	Molvægten af metan [0,016 kg/mol]
Vol <sub>gas</sub> :	Volumen af 1 mol idealgas [m <sup>3</sup> /mol]

Tabel 1-19: Beregninger af metan emission og TS og VS indhold ved lagring af gødningsvæske ved en given lagring (bemærk kun "Glødetab omsat" har pt. indflydelse på metanemissionen ved efterlagring; \* anvendes parametre ikke til beregninger)

<b>Beregninger ved efterlagring af gødningsvæske</b>		Åben lagring	
Valgt metode:	Enhed	Lagring af gødningsvæske, Metode 1	
temperatur i tank *	°C	15	store_temp
Volumen af tank *	m3	200	store_vol
Højde af tank *	m	3,5	store_height
Areal af tank *	m2	57	store_area
Glødetab omsat	%	50	store_prot_degr
Opholdstid i tank *	dage	145	store_hrt
Afbrænding af gas *	-	nej	store_burnCH4
<b>Beregning af gas og massestrømme ved efterlagring</b>			
Gødningsvæske våd vægt	kg	502,3	
Gødningsvæske tør vægt	kg	73,0	
Tørstofindhold i gødningsvæske	-	14,5%	
VS i gødningsvæske	kg VS	33,8	
Potentiel metanproduktion	m3 CH4	15,2	
Potentiel metanproduktion	kg CH4	10,9	
Aktuel metangasemission	kg	5,5	åben lagring!
Aktuelt vægttab til biogas	kg biogas	9,7	

#### 1.3.6.6 Anvendelse af fiberfraktion

Hvis der under valg af biogasanlæg er valgt et anlæg med efterseparering er det vigtigt at definere hvorledes den faste fiberfraktion bliver anvendt. Den kan enten anvendes på landbrugsjorden, eller den kan forbrændes på et affaldsforbrændingsanlæg. Herved opnås energi, men næringssaltene bliver ikke recirkuleret. Der foreligger 3 metodevalg, der kan vælges blandt: anvendelse på mark, forbrænding og en brugerdefineret, Tabel 1-20. Er biogasanlægget valgt uden efterseparering, dannes ingen fiberfraktion og dette ark har ingen indflydelse.

Tabel 1-20: Definition på anvendelser af fiberfraktion

<b>Anvendelse af fiberfraktion</b>	Anvendelse på mark	Forbrænding	Brugerdefineret udspredding på jord
	Anvendelse af fiberfraktion, Metode 1	Anvendelse af fiberfraktion, Metode 2	Anvendelse af fiberfraktion, Metode brugerdefineret
Andel af fiberfraktion til markanvendelse	100%	0%	50 %

Derpå beregner modellen mængden af fiberfraktion, der går til anvendelse på mark eller til forbrænding. Foregår ingen efterseparering på biogasanlægget bliver alle værdier for fiberfraktion til mark og forbrænding lig 0 kg.

Tabel 1-21: Beregning af fiberfraktion til mark og forbrænding (eks. 50 % til jordbrug og 50 % til forbrænding)

Beregninger af anvendelse af fiberfraktion:		Default udspreddning på jord
Valgt metode:	Enhed	Anvendelse af fiberfraktion, Default
Anvendelse på mark	-	50 %
Fiberfraktion til mark	kg	73,8
Tørstof til mark	kg	36,9
VS til mark	kg	17,5
Fiberfraktion til forbrænding	kg	73,8
Tørstof til forbrænding	kg	36,9
VS til forbrænding	kg	17,5

### 1.3.6.7 Substitution af handelsgødning, N, P og K

Ved anvendelse af ikke eftersepareret afgasset affald tilføres struktur materiale samt næringsstoffer til landbrugsjorden. Det antages, at der ikke forekommer tab af næringsalte under bioforgasningsprocessen, og herved føres alle næringsaltene med undtagelse af næringsaltene i det frasorterede rejekt, flydestof og bundfald til markanvendelse. Der vil mistes kvælstof ved ammoniakfordampning efter udlægning og kun en andel af N (60 % (Tønning m.fl. 1997) defineret i ”Forudsætninger.niveau 3”) vil optages af planterne. Ved substitutionen af NPK handelsgødning opstår en energibesparelse for produktion og transport af handelsgødning på hhv. 50 MJ, 16 MJ og 8 MJ per kg N, P og K, der er substitueret (Bundgaard, 1993).

### 1.3.6.8 Forbrændingsanlæg

Da der typisk foregår en forbehandling, og da der vil være nogle restprodukter, som ikke er velegnet til bioforgasning, skal disse behandles andetsteds. Deponering må ikke forekomme såfremt restprodukterne er forbrændingsegne, og forbrænding er den typiske bortskaffelsesmetode i Danmark for rejekt og flydestof. Derfor indeholder modellen en delmodel til beregning af energiforbrug/produktion ved affaldsforbrænding. Det gør desuden modellen i stand til at sammenligne forbrændingsscenarier, hvor al organisk kildesorteret dagrenovation forbrændes, med bioforgasningsscenarier.

Der er valgt 3 teknologier af affaldsforbrænding: Kraftvarme, som både producerer el og fjernvarme, varmtvandsanlæg, som udelukkende producerer fjernvarme og en default teknologi. De tekniske specifikationer for hver forbrændingsteknologi har udelukkende med effektforbrugene og energivirkningsgraderne at gøre. Først defineres den totale energivirkningsgrad for anlægget, derefter anlæggets egetforbrug af både el og varme. El-virkningsgraden defineres hvorefter modellen kan udregne varmevirkningsgraden som forskellen mellem den totale energivirkningsgrad og el-virkningsgraden. Endelig defineres olieforbruget per indfyret ton affald til drift af anlægget, Tabel 1-22. Data hertil stammer fra grønne regnskab fra forbrændingsanlæg.



Tabel 1-22: Tekniske specifikationer på forbrændingsanlæg

Forbrændingsanlæg		Kraftvarme anlæg	Varmtvands anlæg	Forbrændingsanlæg Default
		Forbrændingsanlæg, Metode 1	Forbrændingsanlæg, Metode 2	Forbrændingsanlæg, Default
Enhed				
Energivirkningsgrad	%	87	80	85
Egetforbrug af el	kWh/ton	80	70	80
Egetforbrug af varme	GJ/ton	0	0	0
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	20	0	22
Varmevirkningsgrad (af indfyret, beregnet)	%	67	80	63
Olieforbrug per ton	l/ton	0	0	0

Emissioner af drivhusgasser ved forbrænding af kildesorteret organisk dagrenovation anses for at være neutral. Derfor er energiproduktionen og forbrug de væsentligste parametre ved forbrænding, som har indflydelse på det overordnede energi og CO<sub>2</sub> regnskab. Energiproduktionen beregnes ud fra tørstofindholdet af det afbrændte affald (kg TS) samt brændværdien af tørstoffet (MJ/kg TS). El- og varmeproduktionen beregnes ud fra hhv. el- og varmevirkningsgrader (%) defineret i ark ”Niv.2.6, Forbrænding”. El-, varme- og olieforbrug beregnes på baggrund af enhedsforbrug per ton vådt affald til forbrænding (MJ/ton og liter olie/ton), se Tabel 1-23. Herefter beregnes netto el- og varmeproduktion som forskellene mellem produktion og forbrug.

$$E_{\text{ind}} = \text{br.}_{\text{vTS}} * M_{\text{TS}} - 2,45 \text{ MJ/kg H}_2\text{O} * M_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$E_{\text{ud-brutto}} = E_{\text{ind}} * \epsilon_{\text{inc}}$$

hvor

$E_{\text{ind}}$ : Energi indfyret [MJ]

$\text{br.}_{\text{vTS}}$ : Brændværdi per kg TS [MJ/kg TS]

$M_{\text{TS}}$ : Massen af tørstof [kg TS]

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ : Massen af vand [kg H<sub>2</sub>O]

$E_{\text{ud-brutto}}$ : Brutto energiudvinding [MJ]

$\epsilon_{\text{inc}}$ : Virkningsgrad ved forbrændingsanlæg

Tabel 1-23: Energiberegninger ved affaldsforbrænding

Energiberegninger ved affaldsforbrænding	Enhed	Værdi
Energi ind	MJ	3434
Energi ud, brutto	MJ	2919
El ud, brutto	MJ	756
Varme ud, brutto	MJ	2164
Elforbrug på forbrænding	MJ	143
Varmeforbrug på forbrænding	MJ	0
Olieforbrug på forbrænding	l	0,000
Netto el ud	MJ	612
Netto varme ud	MJ	2164

### 1.3.6.9 Transport af forbehandlet affald og rejekter

Transport af rejekt og evt. forbehandlet affald fra forbehandling til biogasfællesanlæg samt transport og udbringelse af gødningsfraktion beregnes

udfra givne transportafstande og udfra mængder af gødning produceret i biogasfællesanlægget. Transport har et forbrug af dieselolie og derfor opstår et bidrag til emissionen af drivhusgasser. Transporter og afstande, der tages højde for i systemet, ses i Tabel 1-5. Brændselsforbruget beregnes vha. UMIP databasen for lastbiler af 2 forskellige størrelser, samt en middelværdi. Tabel 1-24 viser brændselsforbruget i liter diesel olie per kg affald transporteret per km.

Tabel 1-24: Brændselsforbrug til transporter (UMIP; 1998, bemærk 40 % lastudnyttelse på lille lastbil og 70 % lastudnyttelse på stor lastbil)

Transport, dieselforbrug	enhed	2 ton/læs	16.5 ton/læs	Default transportmetode
		lille lastbil landevej	stor lastbil landevej	Middel
Råolie, brændsel	l/kgkm	1,15E-04	2,43E-05	6,98E-05

Tabel 1-25 viser beregningerne, hvor mængderne der transporteres hentes ind og multipliceres med brændselsforbruget vist i Tabel 1-24.

Tabel 1-25: Beregninger af brændselsforbrug til transport

Transporter	Transport fra – til	Mængde kg	Mængde navn	Afstand km	Afstand navn	Olieforbrug l olie
Fra forbehandling til biogasanlæg	B-C	590	C1	0	km_bc	0,00
Rejekt fra forbehandling til forbrænding	B-F	410	F2	25	km_bf	0,71
Flydestof mv. fra biogasanlæg til forbrænding	C-F	6	F3	25	km_cf	0,01
Afgasset fast stof til forbrænding	D-F	174	F1	25	km_df	0,30
Gødningsvæske fra efterseparering til jordbrug	D-G	324	G1	10	km_dg	0,23
Afgasset fast stof til jordbrug	D-I		I1	0	km_di	0,00
Bundfald til deponering	D-K	4	K1	0	km_dk	0,00
Total		1509		17987		1,26

### 1.3.6.10 Allokering af energi

Der kan i modellen vælges 3 typer af metoder for allokering mellem elproduktion og varmeproduktion. Energimetoden tager hensyn til energiindholdet (kvantiteten) og betragter således ikke kvaliteten. Dvs. el og varme vægtes lige. Exergimetoden er en kvalitetsbetragtning (exergi), hvor el betragtes som energi af højere kvalitet. Ved metoden varmekoefficient tildes hele fordelingen ved samproduktion af el og varme til varmeproduktionen, idet der antages, at elektricitet skal produceres under alle omstændigheder, og varmen er således ”bare” et biprodukt (Energi E2, 2000). Tabel 1-26 viser energibehovet og udvalgte emissioner ved produktion af en MJ energi i form hhv. el og varme.

Tabel 1-26: Metoder til allokering af energiproduktion (Energi E2, 2000, Emissioner mærket med \* anvendes ikke i beregninger)

Allokeringsmetoder til energi		Energimetoden	Exergimetoden	Varmevirkningsgrad
	enhed	EL	EL	EL
Kul	g/MJ	27,5	35,6	41,7
Olie	g/MJ	1,4	1,7	1,9
Naturgas	g/MJ	7,8	10,0	11,7
Orimulsion	g/MJ	12,8	16,4	19,2
Biomasse	g/MJ	0,8	1,1	1,4
Affald	g/MJ	4,2	5,3	6,1
Energi ind total	MJ/MJ	1,4	1,8	2,1
Emissioner				
CO2	g/MJ	119,7	147,5	177,8
SO2 *	g/MJ	0,3	0,3	0,4
NO <sub>x</sub> *	g/MJ	0,2	0,3	0,4
		Energimetoden VARME	Exergimetoden VARME	Varmevirkningsgrad VARME
Kul	g/MJ	27,5	17,2	9,2
Olie	g/MJ	1,4	0,8	0,6
Naturgas	g/MJ	7,8	4,7	2,5
Orimulsion	g/MJ	12,8	8,1	4,2
Biomasse	g/MJ	0,8	0,6	0,3
Affald	g/MJ	4,2	2,5	1,4
Energi ind total	MJ/MJ	1,4	0,9	0,5
Emissioner				
CO2	g/MJ	119,7	71,7	32,2
SO2 *	g/MJ	0,3	0,2	0,0
NO <sub>x</sub> *	g/MJ	0,2	0,1	0,1

### 1.3.7 Resultater fra modelberegninger

#### 1.3.7.1 Antagelser

I arket "Forudsætninger, niveau 2" opgøres de antagelser, der er gjort i det pågældende system. Arket har til formål at kontrollere og give overblik over det system, der system valgt. De antagelser, der kan kontrolleres er, Tabel 1-27:

- Kildesorteringskriterier
- Mængder til forbehandling og bioforgasning
- Mængder direkte til forbrænding
- Forbehandlingsmetode
- Mængder til biogasanlæg samt teknologi
- Energianlæg og produceret metan
- Forbrændingsanlæg
- Mængder og type efterlagring
- Mængder og anvendelse af evt. fiberfraktion
- Indsamlingsområde
- Transportmetode
- Energiallokeringsmetode

SYSTEMBESKRIVELSE				
Anvendte teknologier og deraf følgende massestrømme				Overført data
Procesbeskrivelser	Enhed	Værdi	Navn	Bemærkning, kilde
A: kildesortering	kg	1000	Kildesortering som i København, papirposer	Kildesortering, Metode 1
B: Forbehandling	kg	900	Hydraulisk skruepresse	Forbehandling, Metode 2
C: biogasanlæg	kg	513	Herning, termofil, ingen efterseparering	Biogasanlæg, Metode 2
E: Biogasenergianlæg	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	45	Herning, el+varme	Energianlæg, Metode 2
F: Forbrændingsanlæg, direkte	kg	100	Kraftvarme anlæg	Forbrændingsanlæg, Metode 1
G: Lagring af gødningsvæske	kg	427	Lagring med låg og opsamling og	Lagring af gødningsvæske, Metode 2
H: Anvendelse af fiberfraktion	kg	0	Anvendelse på mark	Anvendelse af fiberfraktion, metode 1
S: Indsamlingsområde	-	-	Blandet bebyggelse	-
T: Transport	-	-	Default transportmetode	Transport, Default
U: Energiproduktion	-	-	Exergimetoden	Miljødeklaration, metode 2

Tabel 1-27: System antagelser

### 1.3.7.2 Massestrømme

Massestrømme vises i arket under samme navn. Her er der mulighed for at se strømmene for affaldet igennem systemet både i tabelform og i grafisk form. I tabellen (

) vises alle kemiske stoffer som er parameteriseret under affaldskarakterisering.

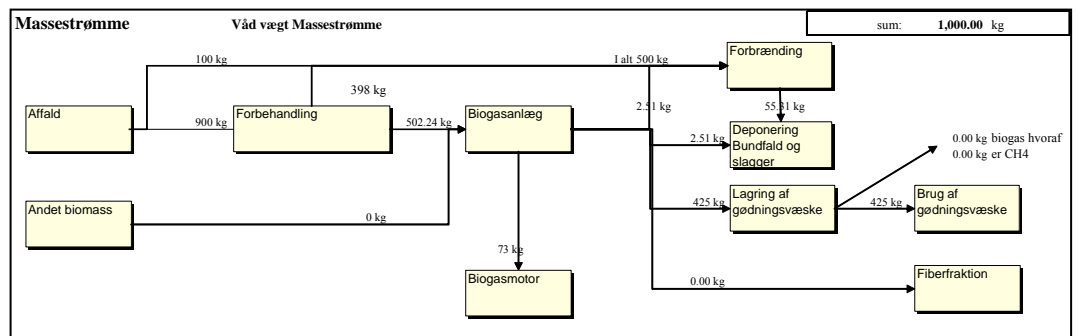
Grafisk kan følgende parametre følges:

- våd vægt affald
- TS
- VS
- H<sub>2</sub>O
- N
- P og
- K

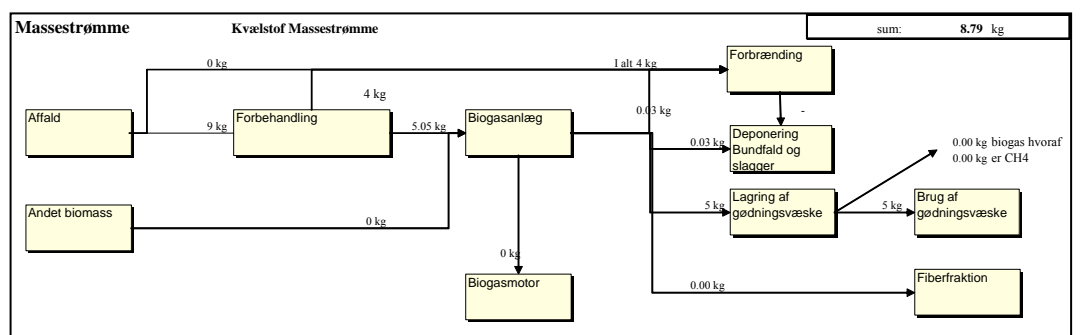
Figur 1-3 viser som eksempel massestrømmene i våd vægt, og heraf kan ses hvilke mængder der føres rundt i affaldssystemet. Figur 1-4 viser som eksempel massestrømmene for kvælstof, hvoraf det kan ses, hvor stor en mængde af den potentielle næringsværdi, der ender som gødning på landbrugsjorden.

Tabel 1-28: Massestrømme for hver substans i de enkelte enhedsprocesser i affaldssystemet

Masse (vv)	Organisk hus- holdningsaffald		I alt inkl. Andet affald		Til forbehandling		Husholdningsaf- fald til biogasanlæg		Flydestof mv. fra biogasanlæg til forbrænding		Bundfald fra biogasanlæg		Husholdningsaff- ald til biogasanlæg		I alt til biogasanlæg		Flydende rest fraktion til lagring		Flydende rest efter lagring		Fiberfraktion til anvendelse på mark		Fiberfraktion til biogasanlæg		Organisk affald direkte til forbrænding		Rejekt til forbrænding		I alt til forbrænding		Resprodukt fra forbrænding					
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg			
Tørstofindhold (TS)	323.00	323	323	323	1000.00	1000	323	323	5.00	5.00	5.00	5.00	1.62	1.62	319.77	319.77	319.77	162.88	162.88	161.62	161.62	0.00	0.00	0.00	0.00	156.89	156.89	0.00	0.00	156.89	156.89	0.00	0.00			
H <sub>2</sub> O	677.00	677	677	677	0.00	0.00	677	677	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	670.23	670.23	670.23	670.23	670.23	670.23	670.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Glødetab (VS)	283.92	283.917	283.917	283.917	283.917	283.917	283.917	283.917	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	281.08	281.08	281.08	70.27	70.27	70.27	70.27	0.00	0.00	0.00	0.00	156.89	156.89	0.00	0.00	156.89	156.89	0.00	0.00	1.42	1.42	
COD	5.19	5.19	5.19	5.19	5.19	5.19	5.19	5.19	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	451.28	451.28	451.28	833.11	833.11	831.85	831.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03		
Hovedbestanddele																																				
C	156.15	156.15	156.15	156.15	156.15	156.15	156.15	156.15	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	154.59	154.59	154.59	81.62	81.62	81.62	81.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.78
H	19.59	19.59	19.59	19.59	19.59	19.59	19.59	19.59	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	19.39	19.39	19.39	10.68	10.68	10.68	10.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10
N	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	10.79	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	10.68	10.68	10.68	0.56	0.56	0.56	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
S	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
O	99.37	99.37	99.37	99.37	99.37	99.37	99.37	99.37	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	98.38	98.38	98.38	98.38	98.38	98.38	98.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50
Cl	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	
Protein	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.26
Fedt	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	50.52	50.52	50.52	50.52	50.52	50.52	50.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.26
Træstof	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	82.82	82.82	82.82	82.82	82.82	82.82	82.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.42
EFOS	308.14	308.14	308.14	308.14	308.14	308.14	308.14	308.14	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	305.06	305.06	305.06	305.06	305.06	305.06	305.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.54	1.54	
P	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		
K	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		
Størrelsesfordeling (af hensyn til virkningsgrader af forbehandlingsudstyr???)																																				
>1 cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
>5 cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	



Figur 1-3: Eksempel på massestrømme, våd vægt, for 1000 kg kildesorteret organisk dagrenovation



Figur 1-4: Eksempel på massestrømme for kvælstof for 1000 kg kildesorteret organisk dagrenovation

### 1.3.7.3 Energistrømme

Produktion af el og varme ved behandling af organisk affald i et biogasanlæg (og forbrænding af restprodukter) erstatter el og varme produceret ved forbrænding af kul, naturgas mv. og indebærer derfor en besparelse i primære energikilder. Derfor angives det samlede resultat for driften af et biogassystem som negative værdier, dvs. negativt forbrug = besparelse af primære energikilder. Energistrømme bliver derfor beregnet i primære energikilder, dvs. el- og varmekonsum og produktion bliver omregnet til energiindholdet i energikilderne, som kræves til indfyrdning ved et konventionelt kraftvarmeværk. Det betyder, at der tages højde for at el og varme har forskellig "kvalitet", idet virkningsgraden på et konventionelt kraftvarmeværk er lavere for elproduktion end for fjernvarme. Dette kræver dog, at man har valgt "exergimetoden" til allokering af energiproduktion. Vælges "energimetoden", som vurderer "kvantiteten" af energi, skelnes der ikke mellem el og fjernvarme, og den primære energi til fremstilling af 1 MJ energi er ens for el og varme. Energistrømmene viser den energi, der bliver forbrugt og produceret under:

- Forbehandling af organisk dagrenovation
- Biogasanlægget inkl. energiproduktion fra biogasmotoren
- Efterlagring (dog altid 0, da der ikke kræves nogen energi, og den opsamlede gas antages ikke at blive brugt til energiproduktion)
- Energiforbrug sparet ved substitution af handelsgødning med gødningsvæske
- Forbrænding af rejekt, flydestof og affald der direkte er ledt til forbrænding
- Indsamling og transport af organisk dagrenovation, rejekter og andre restprodukter fra biogassystemet

Tabel 1-29: Energibalace fra de involverede enhedsprocesser i affaldssystemet

Energi-forbrug og produktion		Forbehandlin g	Biogas anlæg	Lagring	Substitution af gødning	Forbrændi ng	Indsamling og transport	I alt
El ind	MJ	35,64	45	0	0	143	0	
Varme ind	MJ	0	108	0	0	0	0	
Olie ind	l	0,00	0	0	0	0,00	10,20	
El ud	MJ	0	599	0	168,5	756	0	
Varme ud	MJ	0	740	0	0	2164	0	
El netto ind	MJ	36	-554	0	-169	-612	0	
Varme netto ind	MJ	0	-633	0	0	-2164	0	
Primær energi ressourcer ind	MJ	65	-1558	0	-305	-3006	366	-4439

#### 1.3.7.4 CO<sub>2</sub>-strømme

CO<sub>2</sub>-strømmene viser opståede og undgåede emissioner af CO<sub>2</sub>-ækvivalenter, som hovedsagligt er knyttet til energiforbrug og -produktion samt emissioner af uforbrændt metan fra biogasmotoren og ved åben efterlagring af gødningsvæske.

Kuldioxidstrømmene viser udledningen af CO<sub>2</sub>-ækvivalenter fra:

- Energiforbruget til forbehandling af organisk dagrenovation
- Energiforbrug fra biogasanlægget inkl. energiproduktion fra biogasmotoren og udslip af uforbrændt metan
- Metanemissionen ved efterlagring
- Energiforbrug sparet ved substitution af handelsgødning med gødningsvæske
- Enerkiproduktion/forbrug ved forbrænding af rejekt, flydestof og affald, der direkte er ledt til forbrænding
- Indsamling og transport af organisk dagrenovation, rejekter og andre restprodukter fra biogassystemet

Tabel 1-30: CO<sub>2</sub> emissioner fra de involverede enhedsprocesser i affaldssystemet

Emission af drivhusgasser		Forbehandlin g	Biogas anlæg	Lagring	Substitution af gødning	Forbrændi ng	Indsamling og transport	I alt
El netto ind	MJ	36	-554	0	-169	-612	0	
Varme netto ind	MJ	0	-633	0	0	-2164	0	
Olie ind	MJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	365,69	
CO <sub>2</sub> -udslip fra el	kg	5,26	-81,70	0,00	-24,86	-90,30	0,00	
CO <sub>2</sub> -udslip fra varme	kg	0,00	-45,35	0,00	0,00	-155,06	0,00	
CO <sub>2</sub> -udslip fra olieforbrug	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,06	
Metan udslip	kg	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	
I alt CO <sub>2</sub> - ækvivalenter	kg	5,3	-105	0,00	-24,9	-245	27,06	-343

#### 1.3.7.5 Sammenligning af scenarier

I arket "Resultat oversigt" kan et sæt af scenarier sammenlignes. Ved klik på aktiveres en Microsoft Visual Basic makro ("Visresult"), og der udregnes energi og udslip af drivhusgasser for 4 typer kildesortering og 2 typer forbehandling samt resultatet for forbrænding af de 5 typer affald genereret fra kildesorteringskriterierne. Affald fra Grindsted er dog ikke forbehandlet på

BEREGN  
SCENARIER

skruetvask eller rulleligte hvorfor fordelingen af affald ikke kendes. Appendix C viser koden for makroen "Visresult". Tabel 1-31 og Tabel 1-32 viser resultaterne under de i Tabel 1-33 givne antagelser, som er ens for de beregnede scenarier.

Tabel 1-31: Resultatoversigt for forbrug af energi for 5 typer affald, 2 typer forbehandling samt forbrænding

	Kilde-sorterings-metode	Forbe-handlings-metode	MJ primær energi					Indsamling og transport	Total energi
			Forbehandling	Biogasanlæg	Lagring	Subs. gødning	Forbrænding		
Hovedstaden_Rulleligte	hovedstad	rulleligte	117	-1791	0	-361	-2884	361	-4558
Hovedstaden_Skrueseparator	hovedstad	hydr.presse	65	-1558	0	-305	-3006	366	-4439
Hovedstaden_Forbrænding	hovedstad	forbrænding	0	0	0	0	-4650	179	-4471
Kolding_Rulleligte	Kolding	rulleligte	117	-1560	0	-347	-3414	364	-4841
Kolding_Skrueseparator	Kolding	hydr.presse	65	-1616	0	-355	-3350	363	-4893
Kolding_Forbrænding	Kolding	forbrænding	0	0	0	0	-5081	179	-4902
Vejle_Rulleligte	Vejle	rulleligte	117	-1851	0	-410	-3117	360	-4900
Vejle_Skrueseparator	Vejle	hydr.presse	65	-1412	0	-298	-3670	365	-4950
Vejle_Forbrænding	Vejle	forbrænding	0	0	0	0	-5120	179	-4940
Ålborg_Rulleligte	Ålborg	rulleligte	117	-1500	0	-307	-3522	360	-4852
Ålborg_Skrueseparator	Ålborg	hydr.presse	65	-1484	0	-306	-3357	363	-4720
Ålborg_Forbrænding	Ålborg	forbrænding	0	0	0	0	-4746	179	-4566
Grindsted_biogas	grindsted	ingen	0	-3434	0	-594	-1477	349	-5156
Grindsted_Forbrænding	grindsted	forbrænding	0	0	0	0	-4997	179	-4817

Tabel 1-32: Resultatoversigt for udslip af drivhusgasser for 5 typer affald, 2 typer forbehandling samt forbrænding

	Kilde-sorterings-metode	Forbe-handlings-metode	kg CO2-ækvivalenter					Indsamling og transport	Total energi
			Forbehandling	Biogasanlæg	Lagring	Subs. gødning	Forbrænding		
Hovedstaden_Rulleligte	hovedstad	rulleligte	10	-121	0	-29	-235	27	-349
Hovedstaden_Skrueseparator	hovedstad	hydr.presse	5	-105	0	-25	-245	27	-343
Hovedstaden_Forbrænding	hovedstad	forbrænding	0	0	0	0	-380	13	-366
Kolding_Rulleligte	Kolding	rulleligte	10	-105	0	-28	-279	27	-375
Kolding_Skrueseparator	Kolding	hydr.presse	5	-109	0	-29	-273	27	-379
Kolding_Forbrænding	Kolding	forbrænding	0	0	0	0	-415	13	-401
Vejle_Rulleligte	Vejle	rulleligte	10	-125	0	-33	-254	27	-376
Vejle_Skrueseparator	Vejle	hydr.presse	5	-95	0	-24	-300	27	-386
Vejle_Forbrænding	Vejle	forbrænding	0	0	0	0	-418	13	-405
Ålborg_Rulleligte	Ålborg	rulleligte	10	-100	0	-25	-287	27	-377
Ålborg_Skrueseparator	Ålborg	hydr.presse	5	-100	0	-25	-274	27	-366
Ålborg_Forbrænding	Ålborg	forbrænding	0	0	0	0	-387	13	-374
Grindsted_biogas	grindsted	ingen	0	-233	0	-48	-121	26	-376
Grindsted_Forbrænding	grindsted	forbrænding	0	0	0	0	-408	13	-395

Tabel 1-33: Antagelser for scenarier som bliver sammenlignet i "Resultat oversigt"

Processbeskrivelser	Navn	
C: biogasanlæg	Herning, termofil, ingen efterseparering	Biogasanlæg, Metode 2
E: Biogasenergianlæg	Herning, el+varme	Energianlæg, Metode 2
F: Forbrændingsanlæg	Kraftvarme anlæg	Forbrændingsanlæg, Metode 1
G: Lagring af gødningsvæske	Lagring med låg og opsamling og afbrænding af gasser	Lagring af gødningsvæske, Metode 2
H: Anvendelse af fiberfraktion	Default udspreddning på jord	Anvendelse af fiberfraktion, default
S: Indsamling	Blandet bebyggelse	Indsamling, default
T: Transport	Default transportmetode	Transport, Default
U: Energiproduktion	Exergimetoden	Miljødeklaration, metode 2

Energiforbruget er opgjort i Tabel 1-31 i MJ primær energi, og resultatet kan derfor direkte omregnes til en råstofressource, evt. råolie. Tabel 1-34 beregner oliebesparelsen per person per år på scenarierne.

$$E_{olie} = E - (M_{tot\ affald} * affald.pers / (Hu.olie * \rho.olie))$$

hvor

$E_{olie}$ : Energibesparelse opgjort i liter olie per person per år [l/pers/år]

$E$ : Totale energiforbrug [MJ]

$M_{tot\ affald}$ : Totale mængde kildesorteret organisk dagrenovation i scenarier [kg]

affald.pers: Mængden af kildesorteret organisk dagrenovation [kg/pers/år], Tabel 1-6

Hu.olie: Brændværdi for 1 kg olie [MJ/kg olie], Tabel 1-6

$\rho.olie$ : Vægtfylde for et kg olie [kg/l]



Tabel 1-34 viser som eksempel resultater for sparet energi opgjort i liter råolie per person per år som forbruges i affaldssystemet.

Tabel 1-34: Sparet primær energi opgjort i liter råolie per person per år ved en given affaldsproduktion per person per år

<b>SYSTEM</b>	Kilde- sortering metode	Forbe- handling metode	Energi, råressourcer liter olie per person
Hovedstaden_Rullesigte	hovedstad	rullesigte	5,1
Hovedstaden_Skrueseparator	hovedstad	hydr.presse	5,0
Hovedstaden_Forbrænding	hovedstad	forbrænding	5,0
Kolding_Rullesigte	Kolding	rullesigte	5,4
Kolding_Skrueseparator	Kolding	hydr.presse	5,5
Kolding_Forbrænding	Kolding	forbrænding	5,5
Vejle_Rullesigte	Vejle	rullesigte	5,5
Vejle_Skrueseparator	Vejle	hydr.presse	5,5
Vejle_Forbrænding	Vejle	forbrænding	5,5
Ålborg_Rullesigte	Ålborg	rullesigte	5,4
Ålborg_Skrueseparator	Ålborg	hydr.presse	5,3
Ålborg_Forbrænding	Ålborg	forbrænding	5,1
Grindsted_biogas	Grindsted	-	5,7
Grindsted_fobrænding	Grindsted	forbrænding	5,4

## 2. DEL: SCENARIER OG RESULTATER

### 2.1 Indledning

Denne del af bilagsrapporten præsenterer de miljømæssige vurderinger af en række scenarier for bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation. En beregning for hver scenario omfatter dog, som alternativ til kildesortering af det organiske dagrenovation, en uopdelt indsamling af det organiske dagrenovation sammen med andet affald med henblik på forbrænding. Scenarierne har alle som udgangspunkt en kildesorteret mængde af organisk dagrenovation på 1000 kg.

Beregningerne af massestrømme, energi, emissioner af drivhusgasser samt udnyttelse af næringsalte er beregnet med DTU-biogasmodellen, som er beskrevet i det ovenstående (Del 1).

Beregningerne bygger i væsentligt omfang på data bestemt under Miljøstyrelsen basisdokumentation for bioforgasning af organisk dagrenovation; blandt andet sammensætning af kildesorteret organisk dagrenovation, målte biogaspotentialer og data for forbehandlingen (Christensen m.fl. 2002).

Til scenarieberegningerne er der for overblikkets skyld taget udgangspunkt i den kemiske affaldssammensætning af det kildesorterede organiske dagrenovation indsamlet i Hovedstadsområdet, se Tabel 2-1. Beregningerne i referencescenariet samt i de efterfølgende scenarier foretages kun for affald med sammensætning som i Hovedstadsområdet. Et sammenlignende scenario i sammenfatningen sammenligner dog de energi- og CO<sub>2</sub>-mæssige konsekvenser for de forskellige affaldssammensætninger fra de 5 involverede områder i Miljøstyrelsens Basisdokumentation: Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, Ålborg og Grindsted.

Tabel 2-1: Kemisk karakterisering af organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet (beregnet efter Christensen m.fl. 2002)

<b>Kemisk sammensætning af organisk dagrenovation</b>		
	enhed	værdi
Tørstofindhold (TS)	%	29,9
Glødetab (VS)	% af TS	90,7
Nedre brændværdi	MJ/kg TS	19,3
Målt biogaspotentiale	l CH <sub>4</sub> /kg VS	450
<i>Næringsalte</i>		
N	% af TS	3,3
P	% af TS	0,41
K	% af TS	0,99

De gennemførte beregninger omfatter et reference scenario samt 10 scenarier med ændrede parametre til belysning af betydning af usikre data eller ændrede forudsætninger omkring det teknologiske systems funktion. Hvert scenario indeholder 6 beregninger bestående af 5 forskellige forbehandlinger kombineret med bioforgasning samt alternativet, hvor det organiske dagrenovation forbrændes direkte sammen med øvrigt indsamlet affald, Figur 2-1. Der er valgt 5 forskellige

forbehandlinger i alle scenarier, da forbehandlingen antages at være et meget kritisk element i systemet, og hvormed der kun haves begrænsede erfaringer.

Beregningerne i det enkelte scenarierne er mærket a til f:

- a. Forbehandling med rullesigte: data for affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet på rullesigte i Herning
- b. Forbehandling med skrueselevator: data for affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet på skrueselevator i Vaarst Fjellerad (Ålborg)
- c. Forbehandling med stempelpresse: data for affald fra Hovedstadsområdet forbehandlet på fra AFAV
- d. Hypotetisk forbehandling hvor vand og glødetab (VS) fordeler sig ligeligt mellem forbehandlet biomasse og rejekt (andel af H<sub>2</sub>O til biomasse 50 %, andel af VS til biomasse 50 %)
- e. Hypotetisk forbehandling, hvor andelen af glødetab (VS) til biomassen er væsentlig lavere end andelen af vand til biomasse (andel af H<sub>2</sub>O til biomasse 80 %, andel VS af til biomasse 40 %). Herved dannes et rejekt med et relativt højt tørstofindhold og en forbehandlet affaldsfraktion med et lavt tørstofindhold.
- f. Forbrænding af al organisk dagrenovation

Referencerne a-e henviser til forskellige forbehandlingsmetoder, som har betydning for biogasproduktion, affaldsforbrænding af rejekt og dermed også for konsekvenserne for miljøet. Referencerne a, b og c er faktuelle fuld-skala forbehandlinger udført på affald fra Hovedstadsområdet, hvor fordelingen af de karakteristiske parametre er beregnet ud fra analyser af forbehandlet biomasse og rejekt (Christensen m.fl. 2002). Fordelingen for forbehandling c bygger dog kun på et enkelt forsøg, hvor fordelingen for a og b bygger på en større række forsøg. Referencerne d og e er hypotetiske forbehandlinger, hvor vand og VS (og alle resterende kemiske parametre) bliver fordelt henholdsvis u hensigtsmæssigt og meget fordelagtigt set i forhold til bioforgasning og den totale energiproduktion. Fordeling af masse, vand og andre karakteristiske parametre til forbehandlet biomasse til bioforgasning ses i Tabel 2-2. Værdierne er udtryk for den andel mellem 0 og 1 af den enkelte parameter, som føres til biogasanlægget. Den resterende mængde op til værdien 1 af hver parameter føres således til rejektet.

Tabel 2-2: Fordeling af kemiske parametre ved forbehandling til bioforgasning, værdi angiver andelen mellem 0 og 1 af parameteren, som føres i den forbehandlede biomasse til bioforgasning. Den resterende del af parameteren op til værdi 1 antages at blive ført med rejekt til forbrænding.

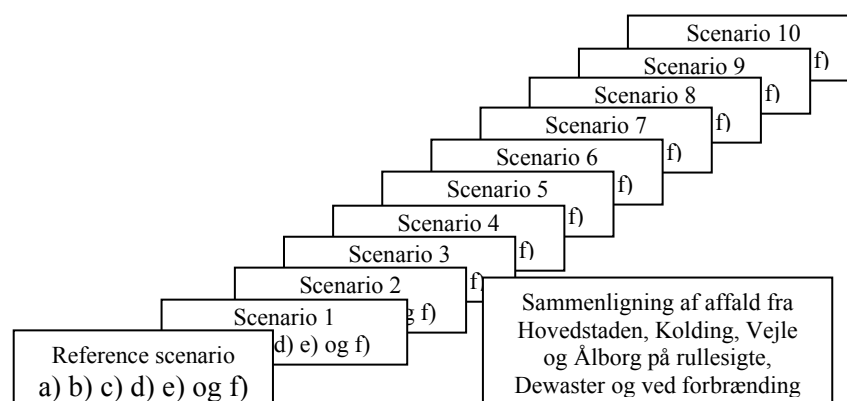
Fordeling ved forbehandling	Parametre til forbehandling					
	Tørstofindhold (TS)	H <sub>2</sub> O	Glødetab (VS)	N	P	K
Ref.a <sup>1)</sup>	0,63	0,73	0,62	0,67	0,68	0,65
Ref.b <sup>1)</sup>	0,53	0,57	0,54	0,58	0,39	0,55
Ref.c <sup>2)</sup>	0,90	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90
Ref.d <sup>3)</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50
Ref.e <sup>3)</sup>	0,4	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4

<sup>1)</sup> Miljøstyrelsens Basisdokumentation

<sup>2)</sup> AFAV forsøg med Hovedstadsområdets affald. Der foreligger kun analyseresultater for TS og VS, resterende stoffer fordeles som TS og VS

<sup>3)</sup> Hypotetisk fordeling

Bilagsrapporten er opbygget indledningsvist med referencescenariets antagelser samt resultater. Derefter følger beskrivelse af hvert af de 10 scenarier med beskrivelse af de ændrede parametre samt de deraf følgende resultater. Endeligt opsummeres og sammenlignes alle scenarier kort.



Figur 2-1: Scenarier og beregninger

I sammenfatningen af scenarierne vurderes parametrene og effekterne af ændrede teknologier, samt en sammenligning af de indsamlede affaldssammensætninger fra de 5 involverede områder i Miljøstyrelsen basisdokumentation:

Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, Ålborg og Grindsted. Sammenligningen foretages for alle områderne med undtagelse for Grindsted for beregninger a), b) og f), dvs. for forbehandling på rullesigte, skrueseparator i Vaarst-Fjellerad samt forbrænding.

## 2.2 Reference scenario

### 2.2.1 Anvendte teknologier i referencescenariet

Dette afsnit beskriver de teknologier, som er indgår i referencescenariet. En del af disse ændres i de scenarier, der beskrives i kapitel 3.:

- Biogasanlægget er valgt som i Herning, termofil men uden væsentlig efterseparering.
- Energiudnyttelse af biogas til både el- og fjernvarmeproduktion.
- Affaldsforbrænding udnytter ligeledes energien til produktion af både el og fjernvarme.
- Efterlagring af gødningsvæske sker med opsamling og afbrænding af gasser uden emission af metan til atmosfæren.
- Indsamlingen antages at foregå i etagebebyggelse.
- Transporter af biomasse og rejekter er valgt med gennemsnitsværdier af små og store lastvogne.
- Allokering af energi mellem el og fjernvarme ved ekstern kraftvarme produktion sker ved exergimetoden, som tager hensyn til kvaliteten af hhv. elektricitet og fjernvarme ved udregning af CO<sub>2</sub> emissioner fra kraftvarmeværker.

Tabel 2-3 viser de valgte teknologier. Navnene henviser til metodevalg i DTU Biogasmodel. De enkelte teknologier er nærmere beskrevet i modeldokumentationen (Del 1).

Tabel 2-3: Teknologier i affaldssystemet gældende for referencescenario

Kildesorteret org. dagrenovation	Kildesortering som i København, papirposer
Biogasanlæg	Herning, termofil, ingen efterseparering
Biogas-energianlæg	Herning, el+varme
Forbrændingsanlæg	Kraftvarme anlæg
Lagringsmetode	Lagring med opsamling og afbrænding af gasser
Indsamlingsområde	Blandet bebyggelse
Transport metode	Default transportmetode
Allokering af energiproduktion	Exergimetoden

Indsamlingen antages at ske i områder med blandet bebyggelse. Desuden antages, at separat indsamling af kildesorteret organisk dagrenovation kræver et dobbelt så stort dieselforbrug (per vægtenhed) i forhold til traditionel indsamling uden kildesortering af organisk dagrenovation. Denne antagelse anses at være den øvre grænse for energiforbruget til separat indsamling. Betydningen af dette valg undersøges senere. Afstand fra indsamlingsområdet til hhv. forbehandlingsanlægget og forbrændingsanlæg er sat til 25 og 15 km, Tabel 2-4. Afstanden på 25 km fra indsamlingsområde til et forbehandlingsanlæg med biogasanlæg kan være lavt sat, men i scenario 3 øges denne afstand til 150 km, for at vurdere betydningen af kørselsafstande.

Tabel 2-4: Indsamlingsområde og dieselforbrug (Interne oplysninger DTU, 2002)

Type beboelsesområde	Forbrug til indsamling, l olie per kg	
	Traditionel indsamling	Separat indsamling
Blandet bebyggelse	4,0E-03	8,0E-03
<b>Transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg</b>		
Afstand til forbehandlingsanlæg	25 km	
afstand til forbrændingsanlæg	15 km	
Dieselforbrug under transport	0,66 E-4 l/kgkm (5 tons last)	

Teknologien for biogasanlæg er defineret som et termofilt biogasanlæg uden væsentlig efterseparering af gødningsvæske. Omsætningen af glødetab (VS) er vurderet ud fra forsøgsanlæg sammenholdt med målte biogaspotentialer til 75 % (beregnet af data i Christensen m.fl. 2002), Tabel 2-5.

Tabel 2-5: Tekniske specifikationer ved biogasanlæg

Biogasanlæg	Biogasanlæg, Metode 2 Herning, termofil, ingen separering	
	enhed	
Glødetab omsat	%	75
Egetforbrug af el	kWh/ton	25
Egetforbrug af varme	GJ/ton	0,22
Opvarmning af biomasse	°C	55
Sikkerhedstillæg af hensyn til varmetab	%	15
Opholdstid i reaktor	døgn	15
Bundfald	%	0,5
Flydestof mv.	%	0,5
<b>Efterseparering</b>		
Andel til Fiberfraktion, våd vægt	%	0
Tørstof i fiberfraktion	% TS	0
Andel til gødningsvæske, vv	%	100

Teknologien for gasmotoren svarer til motoren i Herning, som udnytter gassen til produktion af både fjernvarme og elektricitet. Den totale virkningsgrad for motoren er 85 % hvoraf 38 % er elvirkningsgraden. Metanudslippet af uforbrændt metan fra gasmotoren er sat til 3 % af den producerede mængde metan, hvilket anses som en gennemsnitlig værdi for typiske udslip (J. de Wit, 1998). Se Tabel 2-6.

Tabel 2-6: Tekniske specifikationer ved biogasmotor

<b>Biogasmotor</b>	enhed	Herning, el+varme Energianlæg, Metode 2
Energivirkningsgrad ved forbrænding af biogas	%	85
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	38
Varmevirkningsgrad (af indfyret)	%	47
Metanudslip fra motor	% af metan	3
Metanprocent i biogas	vol. %	65
Brændværdi af metan	MJ/Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	35,9

Affaldsforbrændingsanlægget er defineret til at udnytte energien til produktion af både elektricitet og fjernvarme, hvorved den bedste energivirkningsgrad opnås. Energivirkningsgraden er 85 % hvoraf 22 % er til elproduktion. Egetforbruget på forbrændingsanlægget er fastsat til 80 kWh per ton. Se Tabel 2-7.

Tabel 2-7: Tekniske specifikationer for affaldsforbrændingsanlæg

<b>Affaldsforbrændingsanlæg</b>	enhed	Forbrændingsanlæg, Default
Energivirkningsgrad	%	85
Egetforbrug af el	kWh/ton	80
Egetforbrug af varme	GJ/ton	0
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	22
Varmevirkningsgrad (af indfyret)	%	63
Olieforbrug per ton	l/ton	0

Ved forbrug og produktion af energi i form af el og fjernvarme hhv. forbruges og substitueres energikilder, som indfyres ved kraftvarmeværker. Ligeledes opstår eller undgås emissioner fra kraftvarmeværkerne, og disse energiforhold og emissioner medtages i vurderingen af det samlede affaldssystem. Allokeringen af energikilder og emissioner mellem 1 kWh elektricitet og 1 kWh fjernvarme gøres med exergimetoden, som tager hensyn til ”energikvaliteten”. Herved tillægges elektricitet en højere kvalitet end varme, da udnyttelsesgraden er væsentlig lavere ved elproduktion end ved varmeproduktion. Tabel 2-8 viser energikilder og emissioner der dannes eller substitueres ved forbrug og produktion af el og varme.

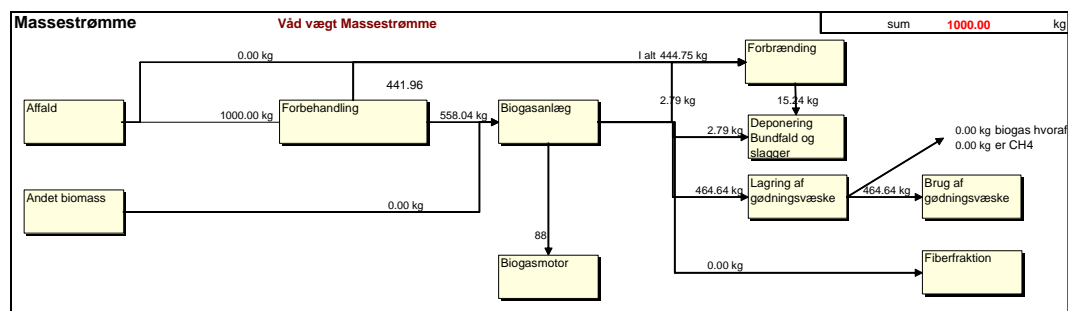
Tabel 2-8: Energideklaration for exergi allokeringemetode (Energi E2, 2000)

<b>Exergimetoden</b>	
<b>Input/output per MJ el</b>	<b>g/MJ el</b>
Kul	35,6
Olie	1,7
Naturgas	10,0
Orimulsion	16,4
Biomasse	1,1
Affald	5,3
Energi ind total	1,8
<i>Emissioner per MJ el</i>	
CO <sub>2</sub>	147,5
SO <sub>2</sub>	0,3
NO <sub>x</sub>	0,3
<b>Input/output per MJ varme</b>	
<b>Input/output per MJ varme</b>	<b>g/MJ varme</b>
Kul	17,2
Olie	0,8
Naturgas	4,7
Orimulsion	8,1
Biomasse	0,6
Affald	2,5
Energi ind total	0,9
<i>Emissioner per MJ varme</i>	
CO <sub>2</sub>	71,7
SO <sub>2</sub>	0,2
NO <sub>x</sub>	0,1

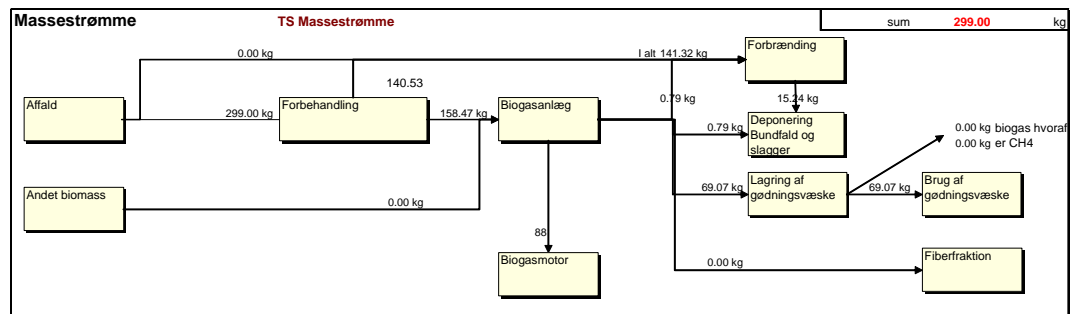
## 2.2.2 Resultater for referencescenariet

Resultaterne fra DTU Biogasmodellen giver en oversigt over massestrømmene i affaldssystemet, en oversigt over energiforbrug og produktioner samt en oversigt af emissioner, eller undgåede emissioner, af drivhusgasser fra systemet (Del 1 for nærmere beskrivelse).

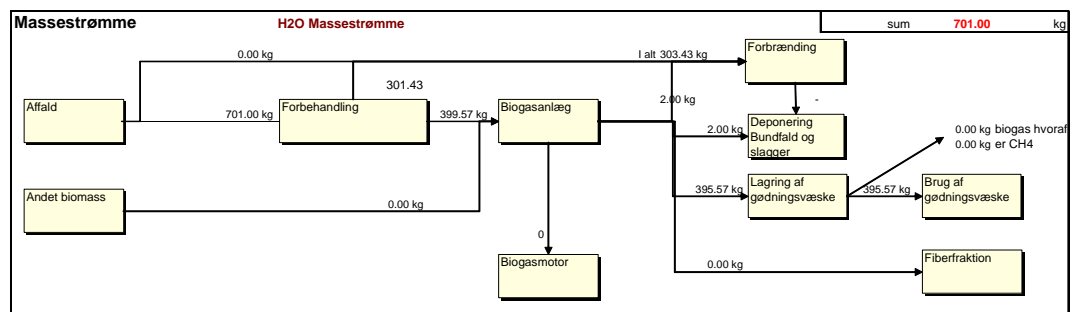
Figur 2.1 til 2.7 viser massestrømmene for våd vægt, TS, vand, VS, og for næringssaltene N, P og K for referencescenario b), som svarer til forbehandling med skrueseparator på Vaarst-Fjellerad biogasanlæg.



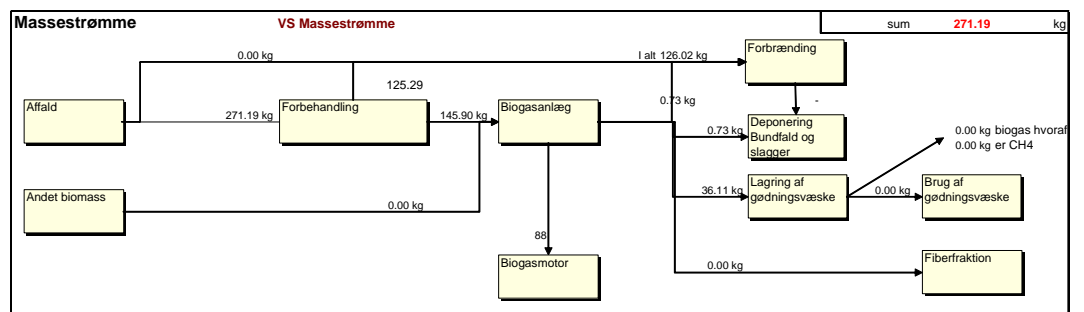
Figur 2-2: Massestrømme for våd vægt for reference scenario b). Figuren viser at rejsktmængden er på ca. 44 % og at biogassen udgør 88 kg per ton kildesorteret organisk dagrenovation til biogasanlæg. Der føres 444 kg til forbrænding og 464 kg gødningsvæske til landbruget.



Figur 2-3: Massestrømme for TS for reference scenario b). Figuren viser at rejktmængden er på ca. 47 % på TS basis og at biogassen udgør 88 kg TS per ton kildesorteret organisk dagrenovation til biogasanlæg. Der føres 141 kg TS til forbrænding og 69 kg TS i gødningsvæske til landbruget.

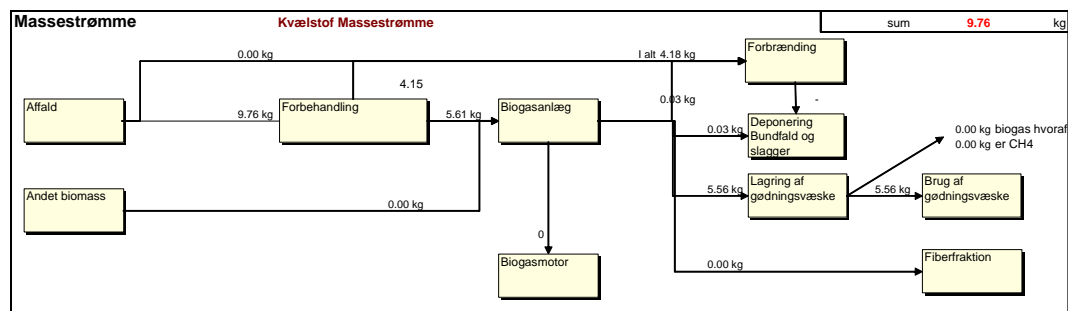


Figur 2-4: Massestrømme for vand for reference scenario b). Størstedelen af vand i kildesorteret organisk dagrenovation føres med gødningsvæsken til landbruget. Der føres dog en stor del, ca. 300 kg, fra forbehandlingen til forbrænding.

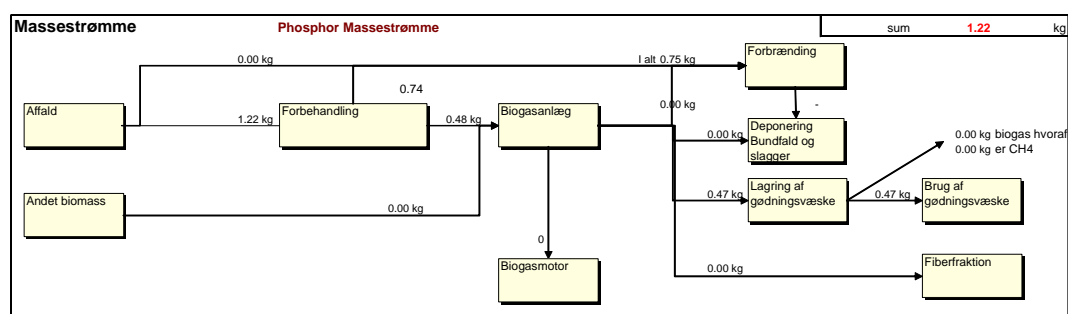


Figur 2-5: Massestrømme for VS reference scenario b). 88 kg VS omsættes til biogas og 36 kg føres videre ikke nedbrudt til landbruget. 125 kg VS føres fra forbehandling til forbrænding.

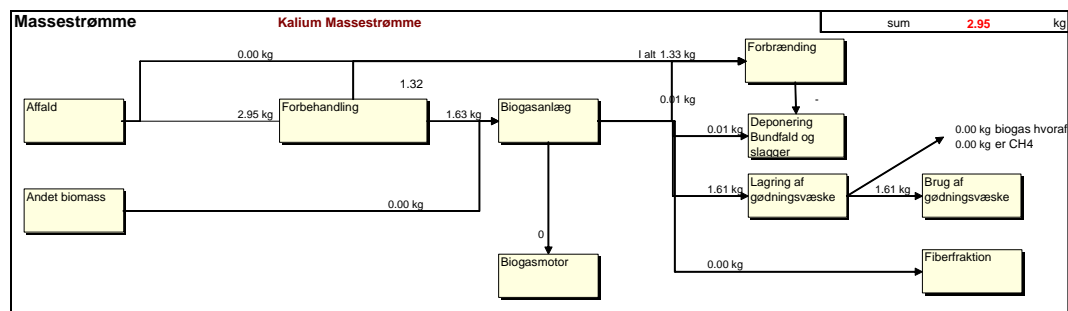




Figur 2-6: Massestrømme for kvælstof for reference scenario b). Knap 6 kg kvælstof, N, som udgør ca. 56 %; føres til landbruget, hvor de resterende 44 % føres fra forbehandling til forbrænding. Der tages ikke i massestrømmene hensyn til afdampning af kvælstof i form af ammoniak.



Figur 2-7: Massestrømme for fosfor for reference scenario b). Fosfor fjernes i højere grad ved forbehandling end kvælstof og derfor føres kun ca. 39 % videre til landbrugsjorden, hvor de resterende 61 % føres fra forbehandling til forbrænding. Det skyldes fordelingen ved forbehandling ved forbehandling b), se Tabel 2-2.



Figur 2-8: Massestrømme for kalium for reference scenario b). Fordelingen af kalium følger billedet fra kvælstof strømmene. Ca. 55 % af det tilstedeværende kalium i kildesorteret organisk dagrenovation føres til landbrugsjorden.

Tabel 2-9 viser forbruget af primær energi i MJ og udslippet af drivhusgasser i kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter. Negative værdier repræsenterer en besparelse af energi eller emission, hvor positive værdier repræsenterer et forbrug af energi eller en emission af drivhusgasser. Værdierne under forbehandling inkluderer elektricitetsforbruget til selve separeringen i en forbehandlede affaldsfraktion og en rejektfraktion. Under biogasanlægget er værdierne en sum af el- og varmekonsum på anlægget samt energiproduktionen og metanemissioner fra biogasmotoren. Resultaterne under lagring refererer til metanemission ved efterlagring af gødningsvæske hos landmændene. Der antages ingen energiforbrug eller -produktion ved lagring, og derfor er energieresultatet under lagring altid 0. Resultatet under subs. gødning

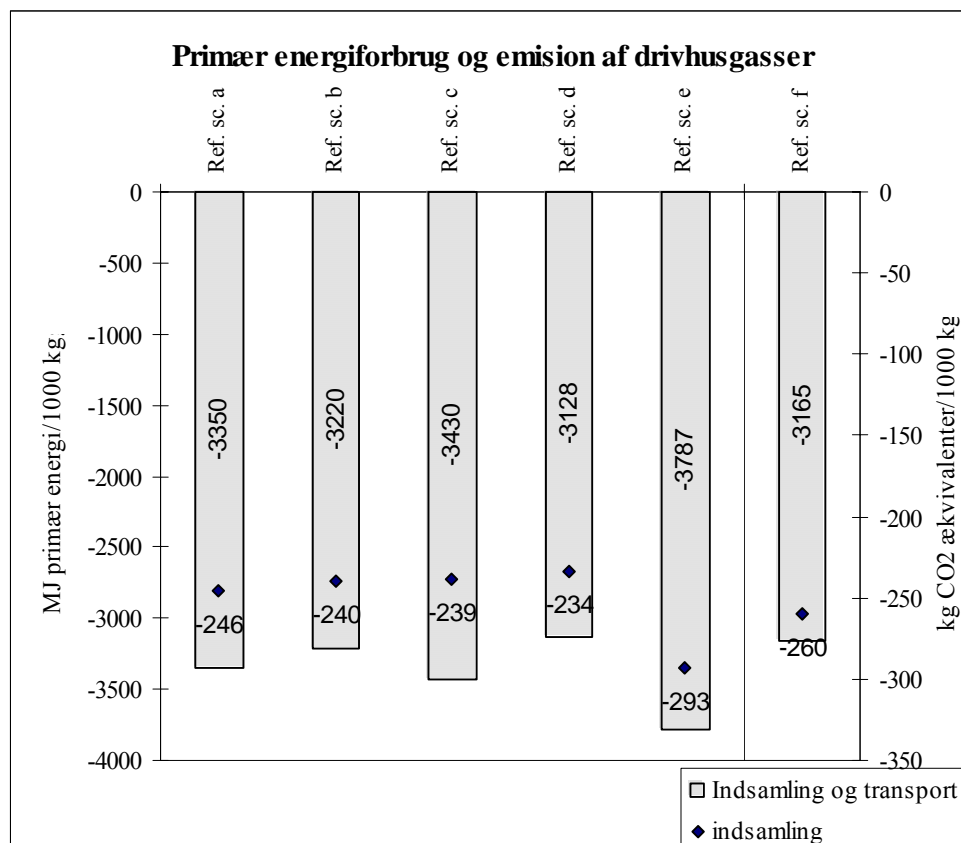
repræsenterer den energimængde, som substitueres ved anvendelse af næringsalte på landbrugsjorden. Resultaterne under forbrænding inkluderer ikke kun energiproduktionen ved affaldsforbrænding, men også de forbrug der måtte være af el og varme. Indsamling og transport inkluderer selve indsamlingen af husholdningsaffaldet, men også de transporter der måtte være af forbehandlet husholdningsaffald, rejekt og afgasset affald mellem behandlingsanlæg og slutdisponering.

Energimæssigt kan en gevinst på op mod 20 % opnås, hvis forbehandlingen er tilstrækkelig effektiv til at sortere vandet i affaldet til bioforgasning og tørstoffet, inklusiv glødetabet, til forbrænding. Hvis forbehandlingen ikke opfylder disse betingelser, opnås ingen gevinst ved bioforgasning i forhold til forbrænding mht. energi. Emissionen af drivhusgasser følger meget energibalancen, da der ved energiproduktion opstår CO<sub>2</sub> emissioner. Der er dog en lidt mindre gevinst med hensyn til drivhusgasser ved bioforgasning, idet der opstår metanudslip fra bl.a. gasmotoren. Da metan har et højt drivhusgaspotentiale (1 kg CH<sub>4</sub> = 25 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter) bidrager dette udslip væsentlig til emissionen af drivhusgasser. Det betyder, at på trods af en energigevinst på ca. 20 % i scenario e, er gevinsten på udslippet af drivhusgasser ”kun” på 13 %. De øvrige scenarier a til d har et større udslip af drivhusgasser (=mindre negativt) end forbrænding, på trods af samme energigevinst.

Tabel 2-9: Resultater for energi og udslip af drivhusgasser for reference scenario (1000 kg)

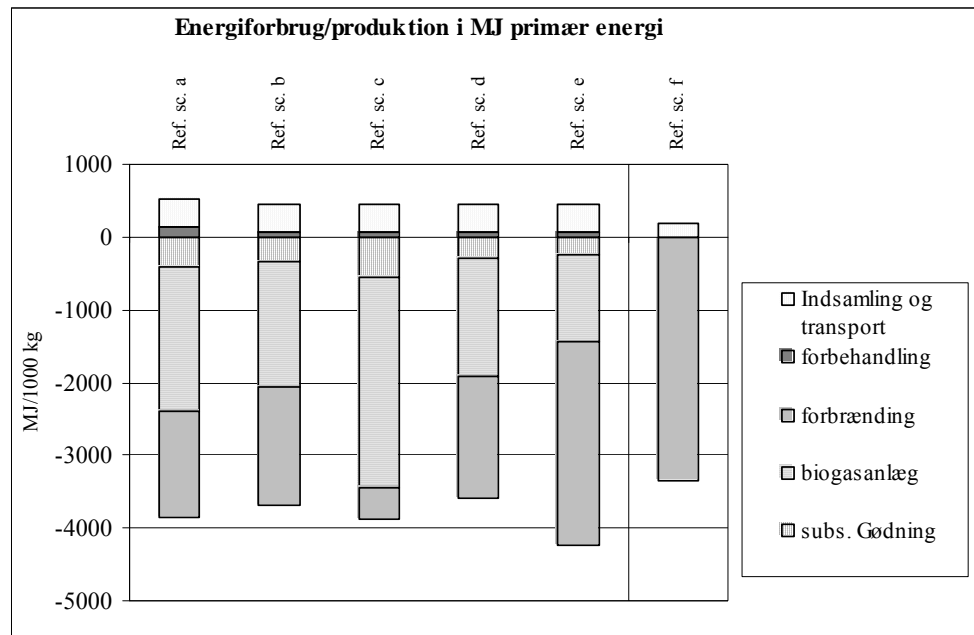
<b>Energi</b> [MJ]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling +transport	total energi
<b>Ref. sc., a</b>	130	-1990	0	-401	-1470	381	-3350
<b>Ref. sc., b</b>	72	-1731	0	-339	-1608	386	-3220
<b>Ref. sc., c</b>	72	-2896	0	-542	-434	371	-3430
<b>Ref. sc., d</b>	72	-1616	0	-301	-1672	389	-3128
<b>Ref. sc., e</b>	72	-1194	0	-241	-2806	382	-3787
<b>Ref. sc., f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>CO2</b> [kg CO <sub>2</sub> -ækv]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling +transport	total energi
<b>Ref. sc., a</b>	11	-134	0	-33	-120	28	-246
<b>Ref. sc., b</b>	6	-117	0	-28	-131	29	-240
<b>Ref. sc., c</b>	6	-195	0	-44	-35	27	-239
<b>Ref. sc., d</b>	6	-109	0	-25	-136	29	-234
<b>Ref. sc., e</b>	6	-79	0	-20	-229	28	-293
<b>Ref. sc., f</b>	0	0	0	0	-273	13	-260

Figur 2-9 viser de totale emissioner af drivhusgasser sammenholdt med det totale energiforbrug. Energiforbruget er i alle scenarier negativt, hvilket betyder at der forekommer en samlet produktion af energi i affaldssystemet.



Figur 2-9: Energiforbrug og emissioner af drivhusgasser for referencescenariet for bioforgasning med 5 typer forbehandling og forbrænding.

Figur 2-10 viser energiforbruget (positive værdier) og energiproduktionen (negative værdier) for de enkelte processer ved affaldssystemet. Det ses, at forbehandlingerne a til d har næsten samme resultat, hvorimod forbehandling e, hvor størstedelen af vandet føres til biogasanlægget og størstedelen af glødetabet til forbrænding, overordnet set har det bedste resultat, som også er væsentlig bedre end forbrænding, referencescenario f. Det fremgår af figuren, at den store energigevinst, skyldes den energi, der opstår ved forbrænding af rejektet, som er relativt tørt i forhold til den ikke forbehandlede dagrenovation.



Figur 2-10: Referencescenario for primær energiforbrug angivet i MJ primær energi for hver enkelt delproces i affaldssystemet. Positive værdier er udtryk for et forbrug, mens negative værdier er udtryk for et undgået forbrug af primære energiresourcer fra energiproduktion i systemet.

## 2.2.3 Fortolkning af resultater

### 2.2.3.1 Energi

Energimæssigt er variationen fra det dårligste biogasscenario til det bedste på 25 %. Det bedste scenario kan dog kun opnås ved en ideel forbehandling. En ideel forbehandling kan defineres ved at føre vandindholdet i det kildesorteret affald til biogas, og samtidig føre tørstof og glødetab til forbrænding. Energigevinsten opnås pga. en meget høj energiproduktion ved affaldsforbrænding af det relative tørre rejekt.

### 2.2.3.2 Drivhusgasser

Emissionen af drivhusgasser er stort set ens for scenario a til d. Scenario e) har dog en væsentlig forbedring på ca. 30 % i forhold til de øvrige biogasscenarier. Det skyldes, at udslippet af uforbrændt metan her ikke er væsentligt, da en meget stor del af affaldet forbrændes, og biogasproduktionen følgelig er mindre end i de øvrige scenarier.

### 2.2.3.3 Næringssalte

Mængden af næringssalte, N, P og K, der føres tilbage til landbrugsjorden, er forskellig for de forskellige delscenarier, idet forbehandlingen har betydning for, hvordan næringssaltene fordeler sig. Potentialet af næringssalte i det kildesorteret organiske dagrenovation er:

- N 9,8 kg/ton
- P 1,2 kg/ton
- K 2,95 kg/ton

Det fremgår af Tabel 2-10, at mængden af næringssalte, der føres til landbrugsjorden, er mere end fordoblet i delscenario c i forhold til e. Dette skyldes, at den samlede rejecktængde er på kun 7 % i c, mens den tilsvarende mængde i

delsscenario e) er 32 %. Ved en stor rejktmængde mistes en stor del af næringssaltene til forbrænding.

Tabel 2-10: Næringssalte tilført landbrugsjord i referencescenario samt andele af potentiale i kildesorteret organisk affald

Næringssalte tilført	N	P	K	Udnyttelse af næringssalte i affald
Referencescenario	kg N/ton	kg N/ton	kg N/ton	%
Ref. a)	6,4	0,8	1,9	65
Ref. b)	5,6	0,47	1,6	55
Ref. c)	8,7	1,09	2,6	89
Ref. d)	4,83	0,61	1,46	50
Ref. e)	3,9	0,48	1,17	40
Ref. f)	0	0	0	0

### 2.3 Scenarier med ændrede parametre

Referencescenariet beskriver et sandsynligt teknologisk system til bioforgasning af kildesorteret organisk dagrenovation, idet forbehandlingen dog er repræsenteret med forskellige aktuelle og hypotetiske teknologier. De øvrige elementer i det teknologiske system kan imidlertid også variere, og der kan være usikkerhed om anvendte forudsætninger og data. Der er derfor gennemført en række yderligere beregninger af scenarier, hvor centrale parametre er søgt varieret. De gennemregnede scenarier vedrører:

- Sc. 1. Ændrede kildesorteringskriterier
- Sc. 2. Lavere energiforbruget ved separat indsamling
- Sc. 3. Øget transportafstand fra indsamlingsområde til biogasanlæg
- Sc. 4. Øget gasmængde produceret på biogasanlæg
- Sc. 5. Elproduktion alene fra biogasanlæg
- Sc. 6. Mindsket mængde af uforbrændt metan fra gasmotor
- Sc. 7. Metanemission ved efterlagring
- Sc. 8. Varmeproduktion alene ved affaldsforbrænding
- Sc. 9. Energisubstitution baseret på stenkul
- Sc. 10. Energisubstitution baseret på naturgas

Scenarierne består, som referencescenarierne, hver især af 6 scenarier: 5 forskellige forbehandlingsteknologier med efterfølgende bioforgasning (a til e) og et forbrændingsscenario (f).

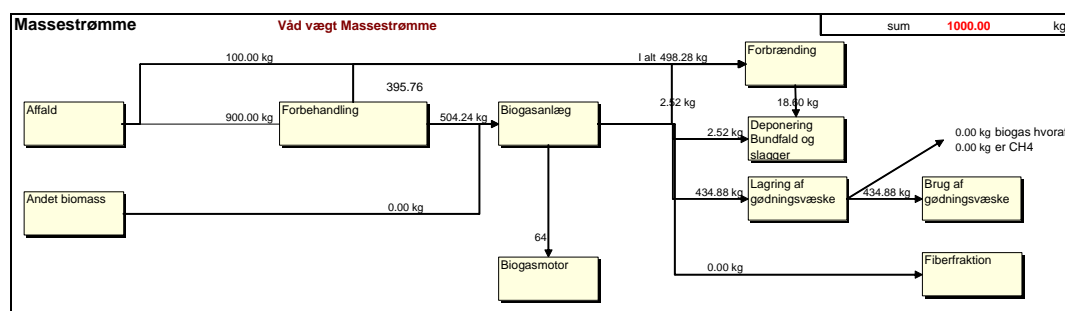
#### 2.3.1 Ændrede kildesorteringskriterier

I Scenario 1 antages at kildesorteringen ændres fra de nuværende sorteringskriterier til et system, hvor kildesorteringskriterierne foreskriver, at tørt organisk dagrenovation indsamles med restfraktionen. Det kan være tørre servietter, køkkenrulle og lignende, som har en god brændværdi, der udnyttes mere optimalt ved affaldsforbrænding. Det antages, at der kan føres 10 % af den organiske fraktion til restfraktionen til forbrænding. Tørstofindholdet i denne mængde antages at være 80%, da den forventes at bestå af den mest tørre del af den organiske dagrenovation. Det medfører at de sidste 90 % af den organiske dagrenovation føres til forbehandling og efterfølgende bioforgasning, Figur 2-11. TS i denne delfraktion er på 24,33 %. Affalds-sammensætningen er som vist i Tabel 2-11. Opnåelse af dette kildesorteringskriterium er muligvis vanskelig, men

scenariet har til formål, at vise i hvilken retning resultaterne vil føre, hvis der søges en ændret kildesortering.

Tabel 2-11: Mængder, TS og VS i referencescenario og i scenario 1

Per 1000 kg organisk dagrenovation	enhed	Scenarier	
		Ref. sc.	Sc. 1
Affald til forbehandling og bioforgasning	kg	1000	900
TS i affald til forbehandling og bioforgasning	%	29,9	24,33
VS i affald til forbehandling og bioforgasning	% af TS	90,7	90,7
affald til forbrænding	kg	0	100
TS i affald til forbrænding	%	-	80
VS i affald til forbrænding	% af TS	-	90,7

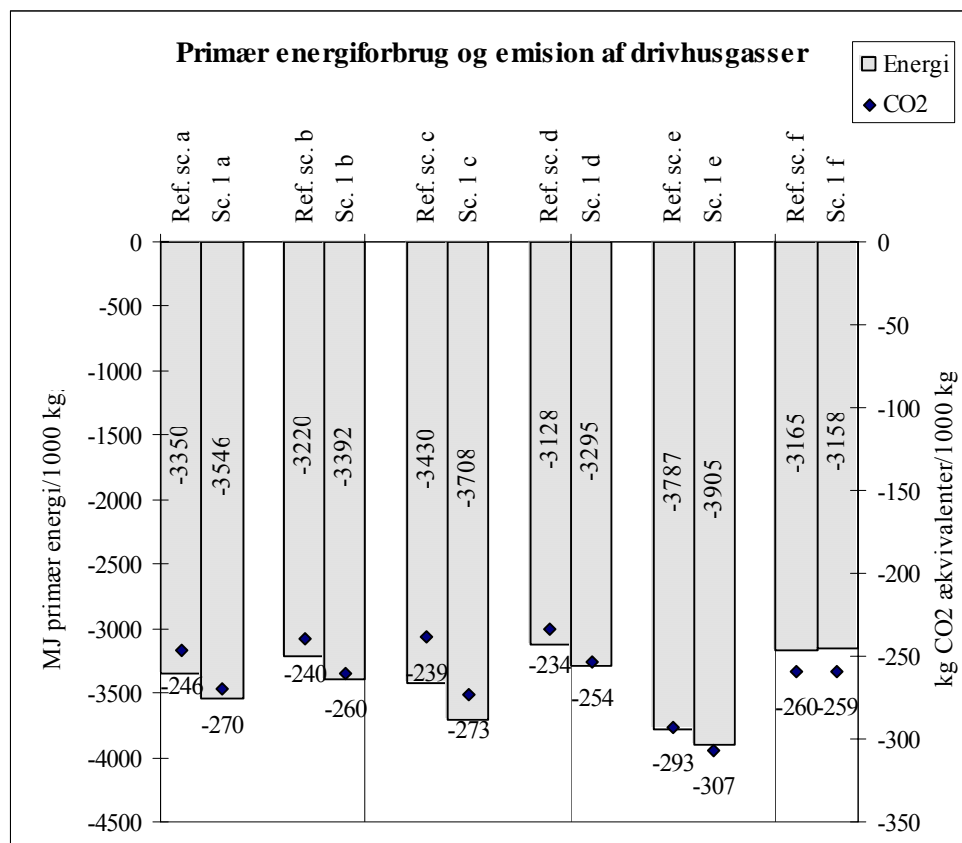


Figur 2-11: Massestrømme for scenario 1b, ændret kildesortering. Det ses at 100 kg føres uden om forbehandling og 900 kg føres til forbehandling.

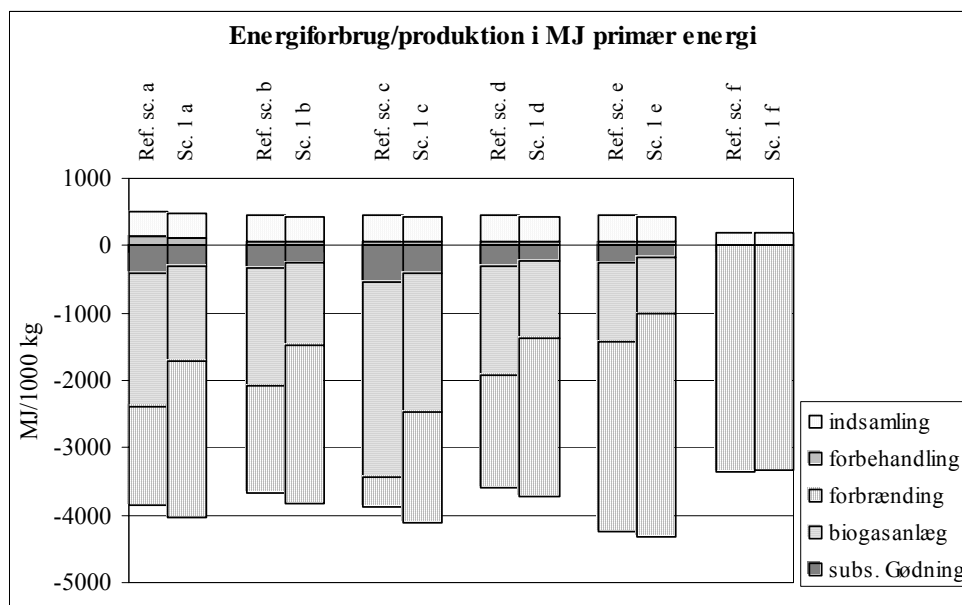
Resultaterne viser en forbedring på i gennemsnit 8 % for energiproduktionen og 11 % på udslippet af drivhusgasser, Tabel 2-12 og Figur 2-12. Det er især forbrændingen, der forbedrer resultatet, da en større andel af affald forbrændes, og denne del har samtidig et mindre vandindhold og dermed et mindre fordampningstab under forbrændingsprocessen. Resultatet for forbrændingsscenario 1f er uændret, hvorved fordelene for biogasscenarierne øges. Scenario 1e har ca. 25 % bedre energigevinst og knap 20 % bedre CO<sub>2</sub>-gevinst end forbrændingsscenariet, Figur 2-13. For de øvrige delscenarier er forskellen 10-15% hvad angår energi.

Tabel 2-12: Resultater fra scenario 1: Ændrede kildesorteringskriterier

<b>Energi [MJ]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling +transport	total energi
<b>Sc. 1, a</b>	117	-1412	0	-294	-2318	361	-3546
<b>Sc. 1, b</b>	65	-1233	0	-248	-2342	366	-3392
<b>Sc. 1, c</b>	65	-2062	0	-397	-1666	352	-3708
<b>Sc. 1, d</b>	65	-1152	0	-220	-2355	368	-3295
<b>Sc. 1, e</b>	65	-827	0	-176	-3329	362	-3905
<b>Sc. 1, f</b>	0	0	0	0	-3338	179	-3158
<b>Drivhusgasser [kg CO<sub>2</sub>-ækv]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling +transport	total CO <sub>2</sub>
<b>Sc. 1, a</b>	10	-94	0	-24	-189	27	-270
<b>Sc. 1, b</b>	5	-83	0	-20	-191	27	-260
<b>Sc. 1, c</b>	5	-138	0	-32	-136	26	-273
<b>Sc. 1, d</b>	5	-77	0	-18	-192	27	-254
<b>Sc. 1, e</b>	5	-54	0	-14	-272	27	-307
<b>Sc. 1, f</b>	0	0	0	0	-272	13	-259



Figur 2-12: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 1: Ændret kildesortering. Både de undgåede energiresourcer og emission af drivhusgasser øges i scenario 1 i forhold til referencescenariet.



Figur 2-13: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 1: Ændre kildesorteringskriterier.

### 2.3.2 Lavere energiforbrug til indsamling

Under referencescenarierne antages, at indsamlingen af den organiske fraktion har et dieselbehov, som er dobbelt så stort som ved traditionel indsamling, og denne

antagelse skal anses som et grænsetilfælde. Det andet grænsetilfælde er, at indsamlingen har samme dieselbehov, uanset om der indsamles separat organisk og restaffald eller traditionelt med hele mængden af dagrenovation. Dette kan i praksis opnås ved at reducere hyppigheden for indsamlingen, f.eks. fra 1 gang ugentlig til 1 gang hver anden uge. Afstande mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg bibeholdes som i referencescenariet, se Tabel 2-13.

Tabel 2-13: Indsamlingsområde og dieselforbrug i scenario 2

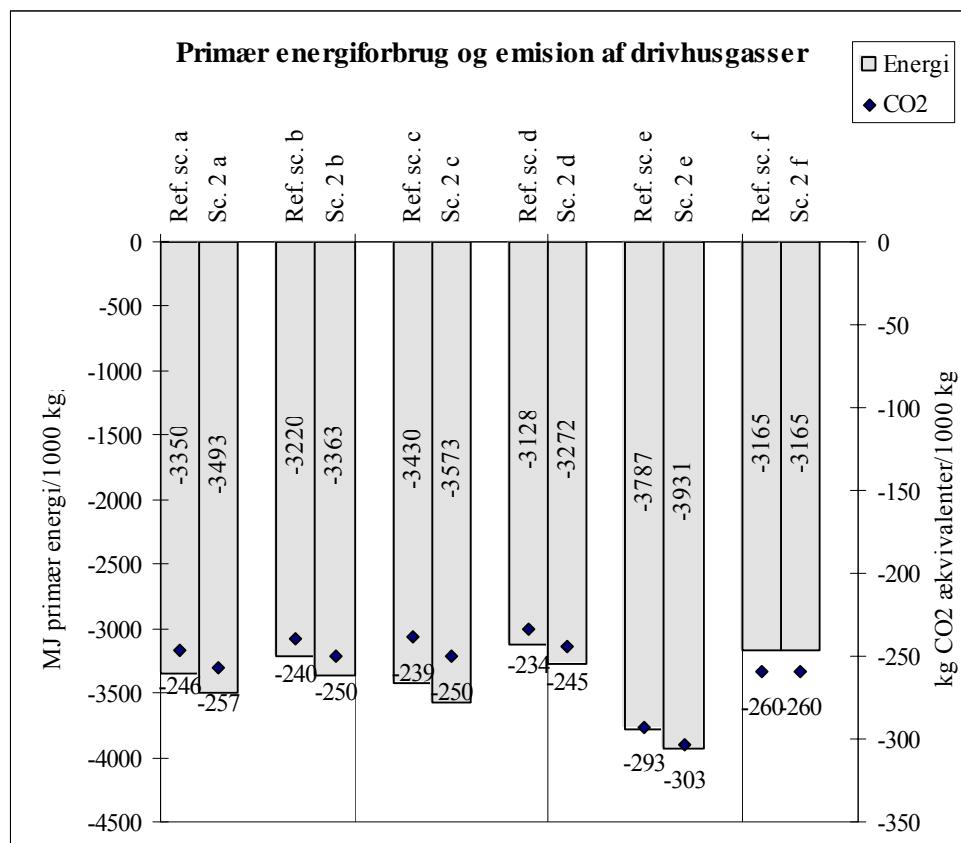
Type beboelsesområde	Forbrug til indsamling, l olie per kg	
	Traditionel indsamling	Separat indsamling
Beskrivelse		
Blandet bebyggelse	4,0E-03	4,0 E-03
<b>Transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg</b>		
Afstand til forbehandlingsanlæg	25 km	
afstand til forbrændingsanlæg	15 km	
Dieselforbrug under transport	0,66 E-4 l/kgkm (ved 5 tons last)	

Resultaterne viser en marginal forbedring på det samlede resultat på ca. 3 % for både energiforbrug og emission af drivhusgasser for bioforgasningsscenerierne (a til e). Resultatet for forbrændingsscenariet er uændret, se Tabel 2-14, Figur 2-14 og Figur 2-15.

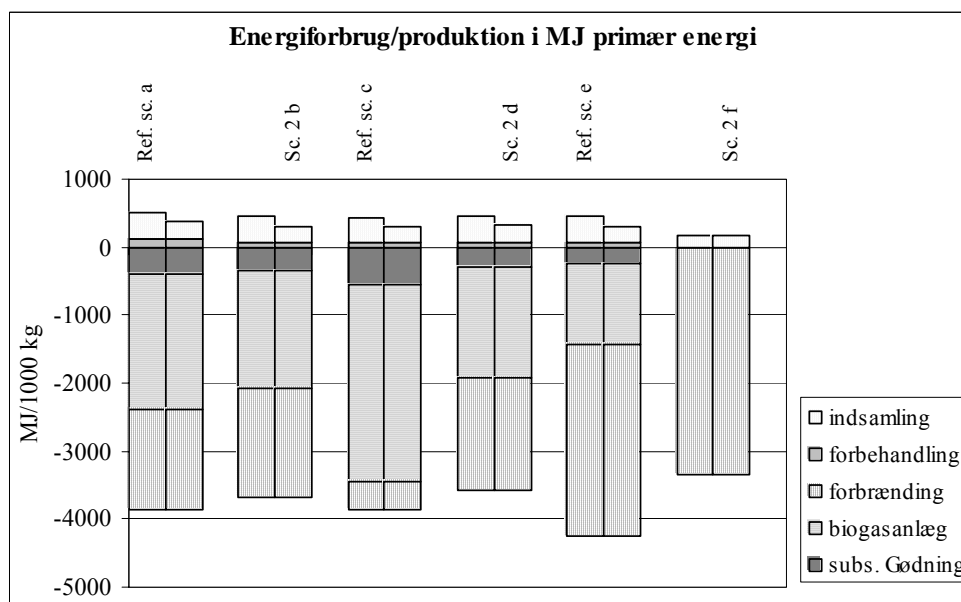
Tabel 2-14: Resultater fra scenario 2: Energiforbrug i indsamlingen

Energi [MJ]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling +transport	total energi
Sc. 2, a	130	-1990	0	-401	-1470	237	-3493
Sc. 2, b	72	-1731	0	-339	-1608	243	-3363
Sc. 2, c	72	-2896	0	-542	-434	227	-3573
Sc. 2, d	72	-1616	0	-301	-1672	245	-3272
Sc. 2, e	72	-1194	0	-241	-2806	239	-3931
Sc. 2, f	0	0	0	0	-3344	179	-3165
Drivhusgasser [kg CO <sub>2</sub> -ækv]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling +transport	total CO <sub>2</sub>
Sc. 2, a	11	-134	0	-33	-120	18	-257
Sc. 2, b	6	-117	0	-28	-131	18	-250
Sc. 2, c	6	-195	0	-44	-35	17	-250
Sc. 2, d	6	-109	0	-25	-136	18	-245
Sc. 2, e	6	-79	0	-20	-229	18	-303
Sc. 2, f	0	0	0	0	-273	13	-260





Figur 2-14: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 2, indsamling. Det mindre dieselforbrug i scenario 2 forbedrer resultaterne marginalt i forhold til referencescenariet.



Figur 2-15: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 2. Energi til indsamling næsten halveres i scenario 2 i forhold til referencescenariet.

### 2.3.3 Øget transportafstand til biogasanlæg

I scenario 3 ændres transportafstanden fra indsamlingsområdet til forbehandlingsanlægget fra 25 km i reference scenariet til 150 km. Dieselforbrug til indsamling er som i referencescenariet, Tabel 2-15.

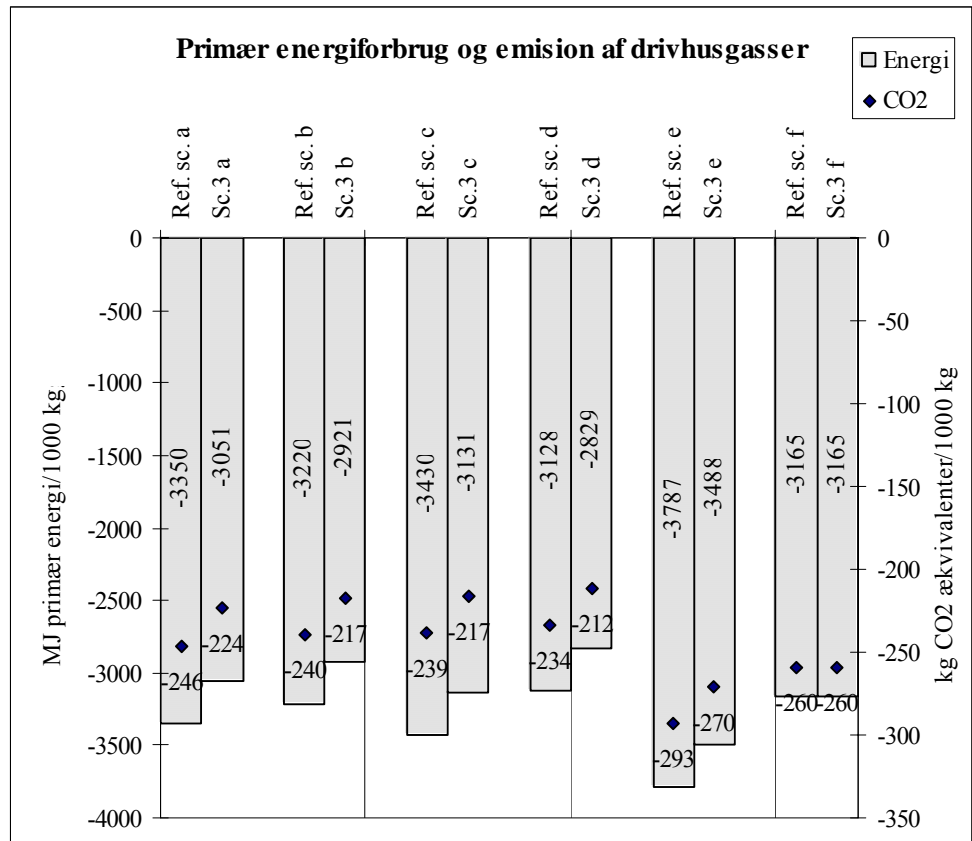
Tabel 2-15: Indsamlingsområde og dieselforbrug i scenario 3

Type beboelsesområde	Forbrug til indsamling, l olie per kg	
	Traditionel indsamling	Separat indsamling
Beskrivelse		
Blandet bebyggelse	4,0E-03	8,0E-03
<b>Transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg</b>		
Afstand til forbehandlingsanlæg	150 km	
afstand til forbrændingsanlæg	15 km	
Dieselforbrug under transport	0,66 E-4 l/kgkm (5 tons last)	

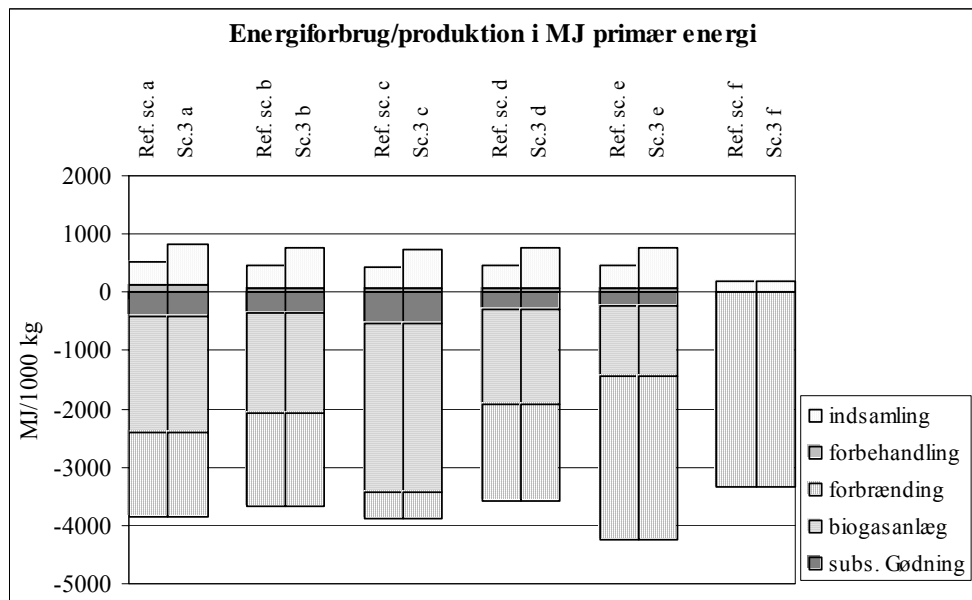
Resultaterne (Tabel 2-16, Figur 2-16 og Figur 2-17) viser en forringelse af resultaterne for biogasscenerierne på 9 % mht. energi og CO<sub>2</sub>. Resultatet for forbrændingsscenariet er uændret. Bioforgasning af organisk dagrenovation er ikke fordelagtigt mht. energi og drivhusgasser i forhold til forbrænding med denne transportafstand med undtagelse af forbehandling som i scenario e.

Tabel 2-16: Resultater fra scenario 3, transportafstand til biogasanlæg

<b>Energi</b> [MJ]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
Sc. 3, a	130	-1990	0	-401	-1470	680	-3051
Sc. 3, b	72	-1731	0	-339	-1608	685	-2921
Sc. 3, c	72	-2896	0	-542	-434	670	-3131
Sc. 3, d	72	-1616	0	-301	-1672	688	-2829
Sc. 3, e	72	-1194	0	-241	-2806	681	-3488
Sc. 3, f	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser</b> [kg CO <sub>2</sub> -ækv]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
Sc. 3, a	11	-134	0	-33	-120	50	-224
Sc. 3, b	6	-117	0	-28	-131	51	-217
Sc. 3, c	6	-195	0	-44	-35	50	-217
Sc. 3, d	6	-109	0	-25	-136	51	-212
Sc. 3, e	6	-79	0	-20	-229	50	-270
Sc. 3, f	0	0	0	0	-273	13	-260



Figur 2-16: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 3 i forhold til referencescenariet: Transportafstande til biogasanlæg. Resultaterne er forringede pga. den større kørselsafstand fra indsamlingsområde til biogasanlægget.



Figur 2-17: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 3. Energiforbruget til indsamling er næsten fordoblet forhold til referencescenariet, ellers er de øvrige delprocesser uændrede.

### 2.3.4 Øget biogasproduktion

De parametre, som anvendes til beregning af metan i biogasanlægget, er det totale glødetab i den forbehandlede organisk dagrenovation, den potentielle

metanproduktion i l CH<sub>4</sub> per kg VS samt nedbrydningsgraden, som beskriver andelen af den potentielle metanproduktion, som faktisk opnås i biogasreaktoren. I referencescenariene antages en nedbrydningsgrad på 75 % (Christensen, m.fl., 2002), mens scenario 4 viser konsekvenserne af en bedre nedbrydning og dermed udnyttelse af metandannelsespotentialer. Nedbrydningsgraden sættes til 85 %, mens øvrige parametre bibeholdes, Tabel 2-17.

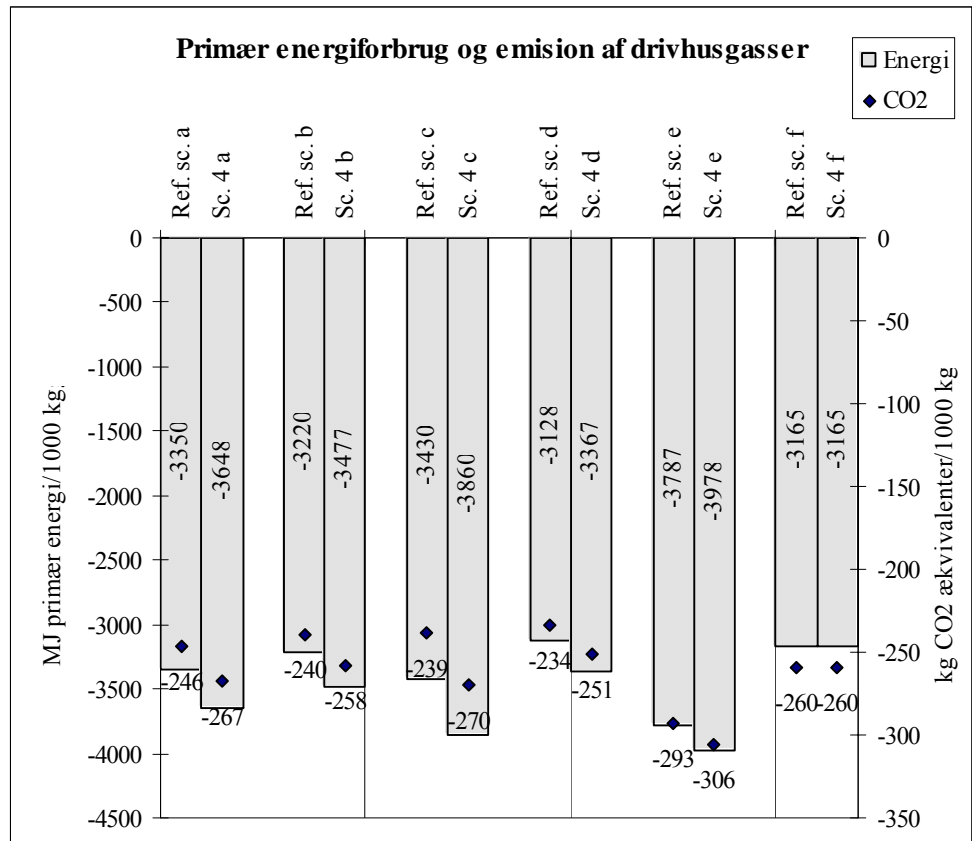
Tabel 2-17: Tekniske specifikationer ved biogasanlæg i scenario 4.

<b>Biogasanlæg</b>	Herning, termofil, ingen separering	
	enhed	Øget gasproduktion
Glødetab omsat	%	85
Egetforbrug af el	kWh/ton	25
Egetforbrug af varme	GJ/ton	0,22
Opvarmning af biomasse	°C	55
Sikkerhedstillæg af hensyn til varmetab	%	15
Opholdstid i reaktor	dage	15
Bundfald	%	0,5
Flydestof mv.	%	0,5
<b>Efterseparering</b>		
Andel til Fiberfraktion, våd vægt	%	0
Tørstof i fiberfraktion	% TS	0
Andel til gødningsvæske, vv	%	100

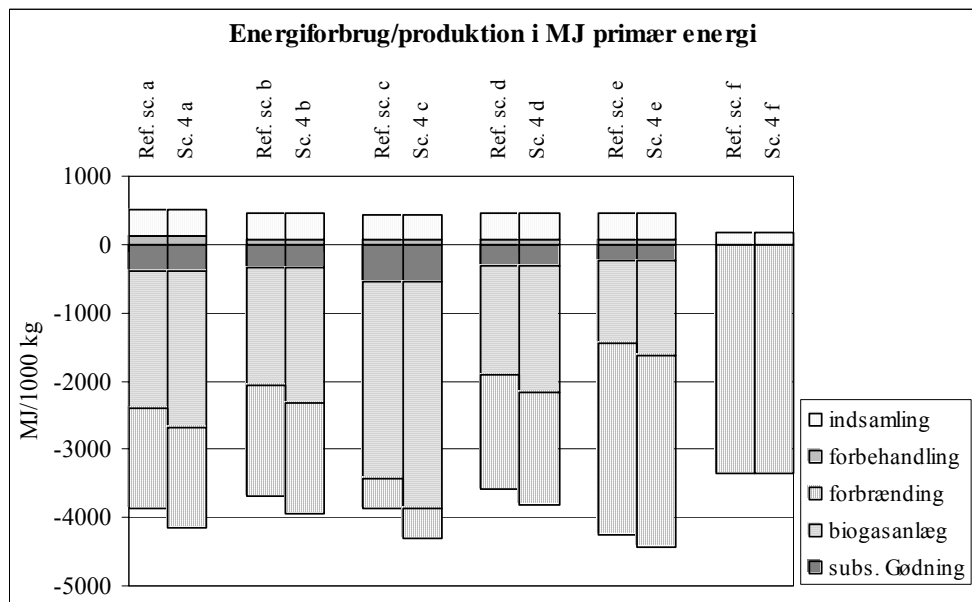
Resultaterne viser en forbedring ved biogasscenariene på mellem 5 og 13 % på energibalancen og 4 og 12 % på CO<sub>2</sub>-balancen. Der er størst forbedring, ved scenario c, hvor mængdemæssigt den største andel af affald bliver bioforgasset. Den mindste forbedring er ved scenario e, da en stor del af energien kommer fra forbrænding, som ikke er berørt af ændringen, men scenario e) er dog alligevel det mest fordelagtige med en energi- og CO<sub>2</sub>-gevinst på ca. 25 % i forhold til forbrænding, Figur 2-18.

Tabel 2-18: Resultater fra scenario 4: Øget biogasproduktion.

<b>Energi</b> [MJ]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
<b>Sc. 4, a</b>	130	-2287	0	-401	-1470	380	-3648
<b>Sc. 4, b</b>	72	-1988	0	-339	-1608	386	-3477
<b>Sc. 4, c</b>	72	-3325	0	-542	-434	370	-3860
<b>Sc. 4, d</b>	72	-1854	0	-301	-1672	388	-3367
<b>Sc. 4, e</b>	72	-1385	0	-241	-2806	382	-3978
<b>Sc. 4, f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser</b> [kg CO <sub>2</sub> -ækv]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
<b>Sc. 4, a</b>	11	-154	0	-33	-120	28	-267
<b>Sc. 4, b</b>	6	-134	0	-28	-131	29	-258
<b>Sc. 4, c</b>	6	-225	0	-44	-35	27	-270
<b>Sc. 4, d</b>	6	-126	0	-25	-136	29	-251
<b>Sc. 4, e</b>	6	-92	0	-20	-229	28	-306
<b>Sc. 4, f</b>	0	0	0	0	-273	13	-260



Figur 2-18: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 4, øget nedbrydningsgrad af glødetab. Resultaterne forbedres i forhold til referencescenariet pga. den øgede nedbrydning af VS.



Figur 2-19: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 4. Energiproduktion ved biogasanlægget øges i forhold til referencescenariet, men hvor de øvrige delprocesser er uændrede.

### 2.3.5 Elproduktion alene fra biogasmotor

I scenario 5 antages at gasmotoren kun udnytter energien til elektricitet uden udnyttelse af varmen til fjernvarme. Dette mindsker den samlede virkningsgrad fra 85 % til 38 %, Tabel 2-19.

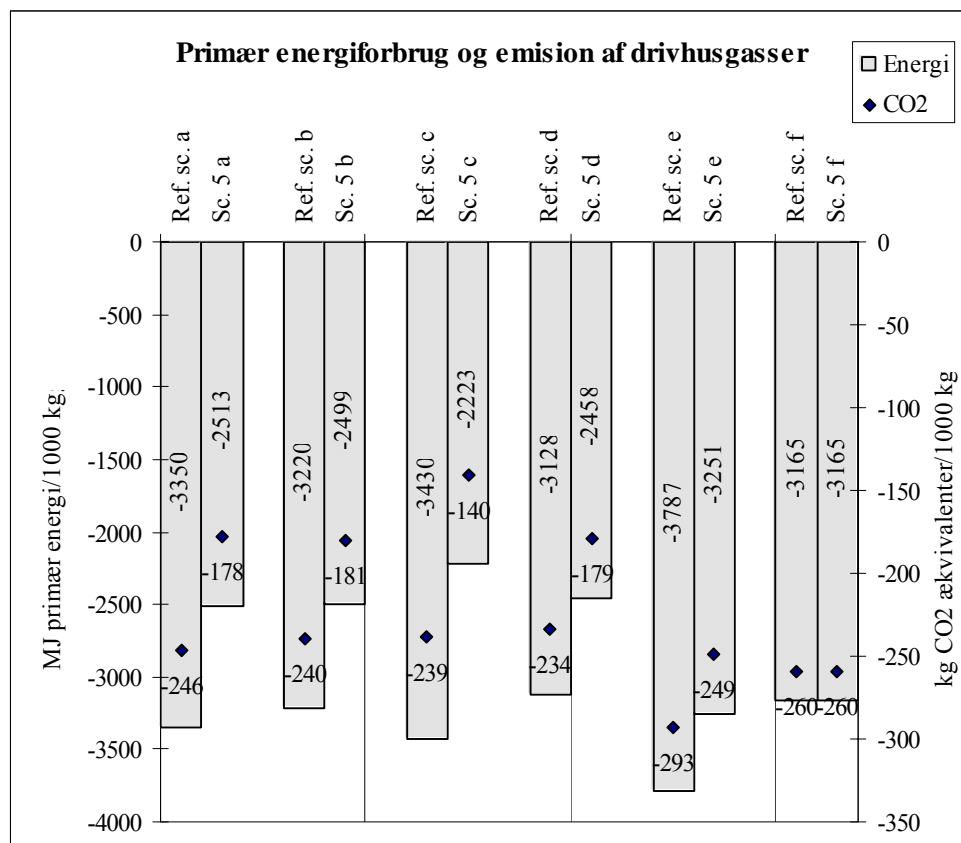
Tabel 2-19: Tekniske specifikationer ved biogasmotor i scenario 5.

<b>Biogasmotor</b>	enhed	Herning, el - varme Modificeret
Energivirkningsgrad ved forbrænding	%	38
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	38
Varmevirkningsgrad (af indfyret)	%	0
Metanudslip fra motor	% af metan	3
Metanprocent i biogas	%	65

Resultatet har størst konsekvenser for scenarier hvor størstedelen af energien kommer fra biogasanlægget, især i scenario c, hvor forringelsen er på ca. 35 % på energi og CO<sub>2</sub> i forhold til referencescenariet. Scenario e har en forringelsen på ca. 14 %. Forbrændingsresultatet er uændret, og er fordelagtigt i forhold til scenarierne a til d, og ligestillet med scenario e, Figur 2-20.

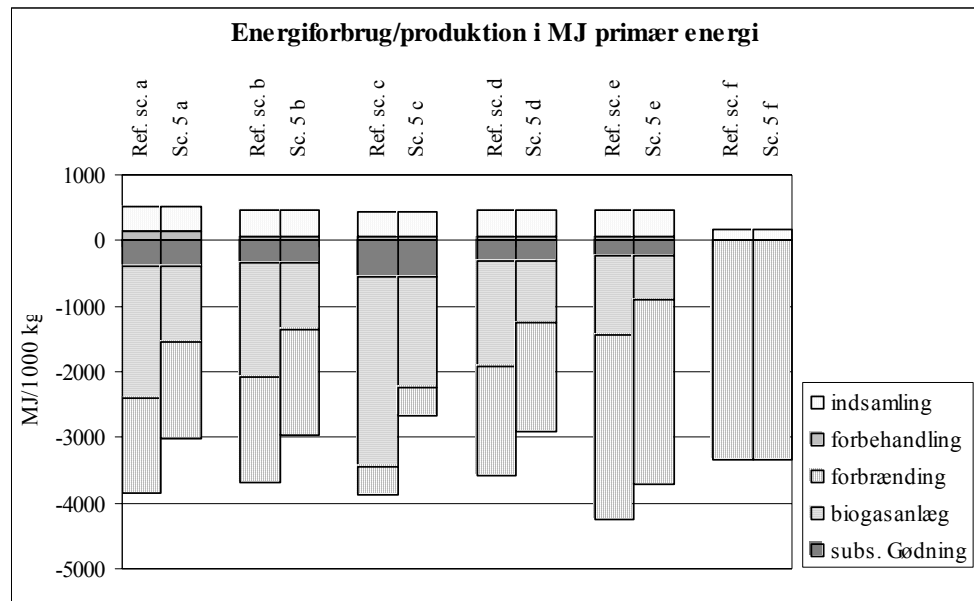
Tabel 2-20: Resultater fra scenario 5: Energiproduktion af biogas

<b>Energi [MJ]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
<b>Sc. 5, a</b>	130	-1153	0	-401	-1470	381	-2513
<b>Sc. 5, b</b>	72	-1010	0	-339	-1608	386	-2499
<b>Sc. 5, c</b>	72	-1689	0	-542	-434	371	-2223
<b>Sc. 5, d</b>	72	-945	0	-301	-1672	389	-2458
<b>Sc. 5, e</b>	72	-658	0	-241	-2806	382	-3251
<b>Sc. 5, f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser [kg CO<sub>2</sub>-ækv]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
<b>Sc. 5, a</b>	11	-66	0	-33	-120	28	-178
<b>Sc. 5, b</b>	6	-58	0	-28	-131	29	-181
<b>Sc. 5, c</b>	6	-97	0	-44	-35	27	-140
<b>Sc. 5, d</b>	6	-54	0	-25	-136	29	-179
<b>Sc. 5, e</b>	6	-35	0	-20	-229	28	-249
<b>Sc. 5, f</b>	0	0	0	0	-273	13	-260



Figur 2-20: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 5, energiproduktion ved biogasmotor. Resultaterne i forhold til referencescenariet er væsentlig forringede pga. den lavere udnyttelsesgrad af biogassen.

Af Figur 2-21 fremgår at den energiproduktionen ved biogasanlægget ikke mindskes i samme forhold som energivirkningsgraden i Tabel 2-19, idet exergibetragtningen anvendes til omregning fra produceret energi til primær energi. Da elproduktionen bevares, bevares ligeledes størstedelen af besparelsen af primære energiressourcer, da el er energi af højere kvalitet end varme.



Figur 2-21: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 5. Den lavere energivirkningsgrad ved gasmotoren er årsagen til den lavere produktion.

### 2.3.6 Mindsket metanudslip fra gasmotor

I referencescenariet er udslippet af uforbrændt metan gennem motoren 3 % af den samlede mængde metan dannet i biogasanlægget, men i scenario 6 antages en reduktion i metanudslippet svarende til kun 1 % udslip som følge af udviklingen af bedre motorer. Energivirkningsgraden ved biogasmotoren stiger til 87 %, da mere metan forbrændes i motoren, Tabel 2-21.

Tabel 2-21: Tekniske specifikationer ved biogasmotor i scenario 6

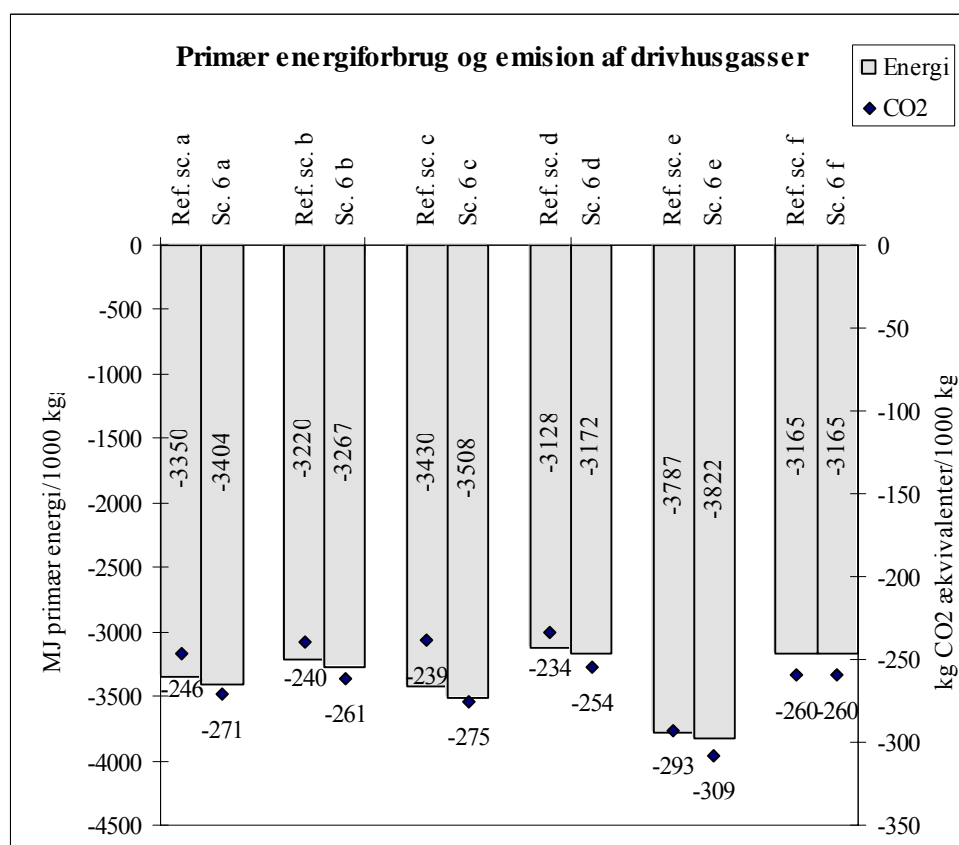
<b>Biogasmotor</b>	enhed	Herning, el+varme Modificeret
Energivirkningsgrad ved forbrænding	%	87
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	39
Varmevirkningsgrad (af indfyret)	%	48
Metanudslip fra motor	% af metan	1
Metanprocent i biogas	%	65

Resultaterne viser en forbedring af biogasscenarierne på i gennemsnit 8 % mht. udslippet af drivhusgasser. Drivhusgasudslippet for forbrænding samt energibalancen for biogasscenarierne er uændret i forhold til referencescenarierne.



Tabel 2-22: Resultater fra scenario 6: Reduceret metanudslip fra gasmotor

<b>Energi [MJ]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
<b>Sc. 6, a</b>	130	-2044	0	-401	-1470	381	-3404
<b>Sc. 6, b</b>	72	-1778	0	-339	-1608	386	-3267
<b>Sc. 6, c</b>	72	-2974	0	-542	-434	371	-3508
<b>Sc. 6, d</b>	72	-1659	0	-301	-1672	389	-3172
<b>Sc. 6, e</b>	72	-1229	0	-241	-2806	382	-3822
<b>Sc. 6, f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser [kg CO<sub>2</sub>-ækv]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO2
<b>Sc. 6, a</b>	11	-157	0	-33	-120	28	-271
<b>Sc. 6, b</b>	6	-137	0	-28	-131	29	-261
<b>Sc. 6, c</b>	6	-229	0	-44	-35	27	-275
<b>Sc. 6, d</b>	6	-128	0	-25	-136	29	-254
<b>Sc. 6, e</b>	6	-94	0	-20	-229	28	-309
<b>Sc. 6, f</b>	0	0	0	0	-273	13	-260



Figur 2-22: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 6: Reduceret metanudslip ved gasmotor. Energiforbruget er uændret i forhold til referencescenariet. Resultatet for drivhusgasser er marginalt forbedret pga. den lavere emission af uforbrændt metan fra gasmotoren.

### 2.3.7 Metanudslip ved efterlagring

Opsamling af biogas fra efterlagring af gødningssvæske sker kun meget sjældent hos landmændene. Derfor antager scenario 7 i modsætning til referencescenariet, at efterlagring af gødningssvæske foregår uden opsamling af gasser. Herved kan den delvist afgassede biomasse fortsat producere metan, som emitterer til atmosfæren.

Omsætningen er sat til 8 %<sup>1</sup> af det tilbageværende metandannelsespotential, Tabel 2-23. Dette tilbageværende potentiale består af 25 % af det totale potentiale (75 % af den potentielle metanproduktion udnyttes i biogasanlægget), hvilket betyder, at 6 % heraf svarer til 2 % af den producerede metan.

Tabel 2-23: Tekniske specifikationer for efterlagring af gødningsvæske i sc. 7

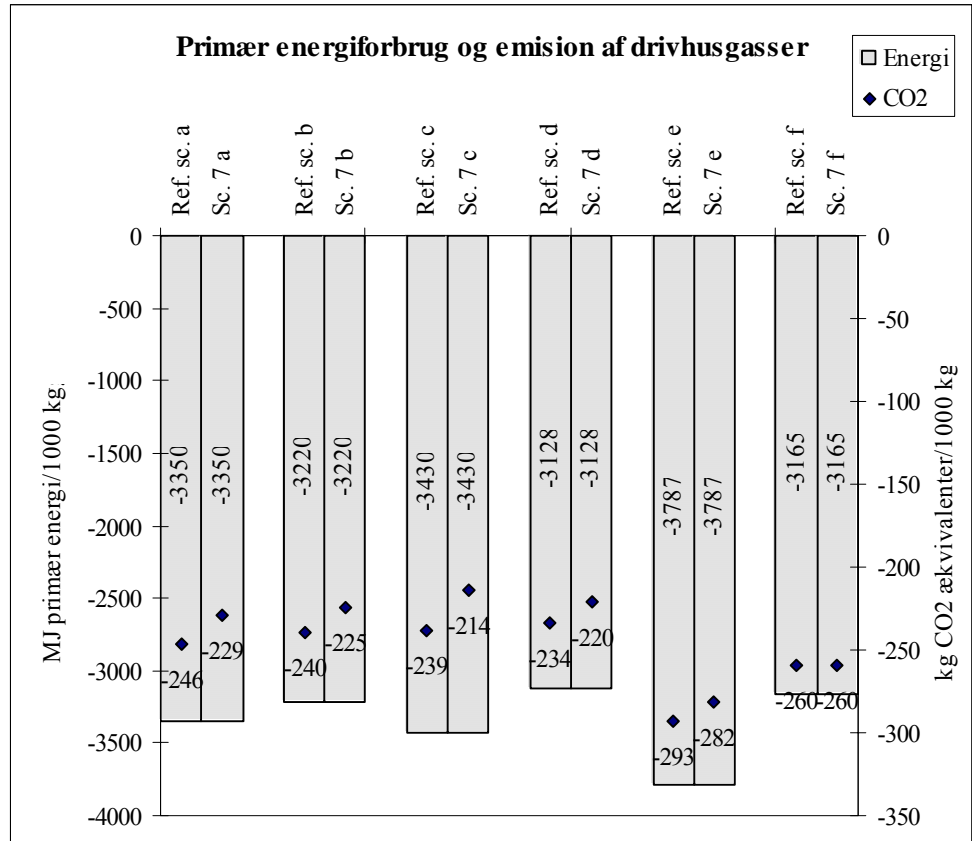
<b>Efterlagring</b>		
	enhed	Lagring af gødningsvæske, modifieret
Omsætningsgrad af potentiel produktion	%	6
Afbrænding af metan	-	nej

Resultatet viser en forringelse mht. emissionen af drivhusgasser på mellem 17 kg og 38 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter per ton, svarende til 6 og 12 %, størst forringelse på scenarierne a til d og mindst på scenario e. Resultatet for forbrænding samt energibalancerne for alle beregninger er uændret.

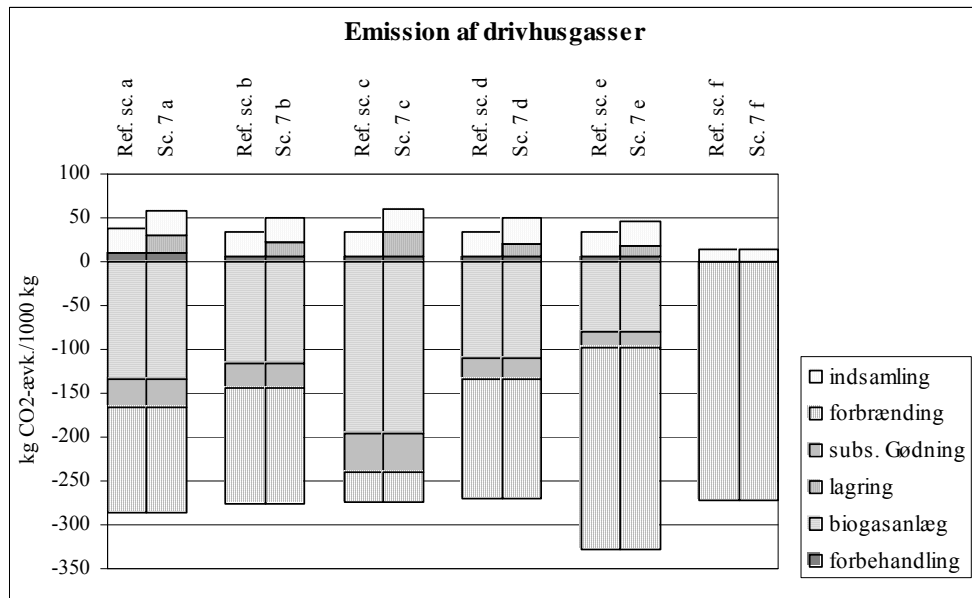
Tabel 2-24: Resultater fra scenario 7: Øget metanudslip fra efterlagring

<b>Energi [MJ]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
<b>Sc. 7, a</b>	130	-1990	0	-401	-1470	381	-3350
<b>Sc. 7, b</b>	72	-1731	0	-339	-1608	386	-3220
<b>Sc. 7, c</b>	72	-2896	0	-542	-434	371	-3430
<b>Sc. 7, d</b>	72	-1616	0	-301	-1672	389	-3128
<b>Sc. 7, e</b>	72	-1194	0	-241	-2806	382	-3787
<b>Sc. 7, f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser [kg CO<sub>2</sub>-ækv]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
<b>Sc. 7, a</b>	11	-134	19	-33	-120	28	-229
<b>Sc. 7, b</b>	6	-117	16	-28	-131	29	-225
<b>Sc. 7, c</b>	6	-195	27	-44	-35	27	-214
<b>Sc. 7, d</b>	6	-109	15	-25	-136	29	-220
<b>Sc. 7, e</b>	6	-79	12	-20	-229	28	-282
<b>Sc. 7, f</b>	0	0	0	0	-273	13	-260

<sup>1</sup> Foreløbige resultater viser, at metan produktionen for afgasset organisk dagrenovation varierer mellem 1 % af potentialet ved 5° C og 10 % af potentialet ved 20° C (Interne oplysninger, DTU, 2002).



Figur 2-23: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 7: Øget metanudslip ved efterlagring. De undgåede emissioner af drivhusgasser mindskes i forhold til referencescenariet ved en ukontrolleret åben lagring af gødningsvæske.



Figur 2-24: Emission af drivhusgasser for scenario 7 og for referencescenariet. Efterlagring af gødningsvæske medfører et betydeligt bidrag til emission af drivhusgasser, hvorved resultatet for drivhusgasser forringes.

### 2.3.8 Fjernvarmeproduktion alene ved forbrændingsanlæg

I referencescenariet antages et effektivt forbrændingsanlæg, som udnytter forbrændingsvarmen til produktion af både el og varme. I scenario 8 antages, at kun fjernvarme produceres på et varmtvandsanlæg, hvor energivirkningsgraden er 80 % imod 85 på et kombineret kraftvarme anlæg, som anvendes i referencescenariet, Tabel 2-25. Dette scenario kan være interessant, da ikke alle ovnlinjer på forbrændingsanlæggene på nuværende tidspunkt har energiudnyttelse til produktion af elektricitet. Der kan derfor argumenteres for, at den mængde affald, der fjernes fra forbrænding, i realiteten fjernes fra disse ovnlinjer, da man ønsker at holde driften oppe på kapacitetsmaximum for de øvrige ovnlinjer, hvor både el og varme produceres.

Tabel 2-25: Tekniske specifikationer for affaldsforbrændingsanlæg i scenario 8

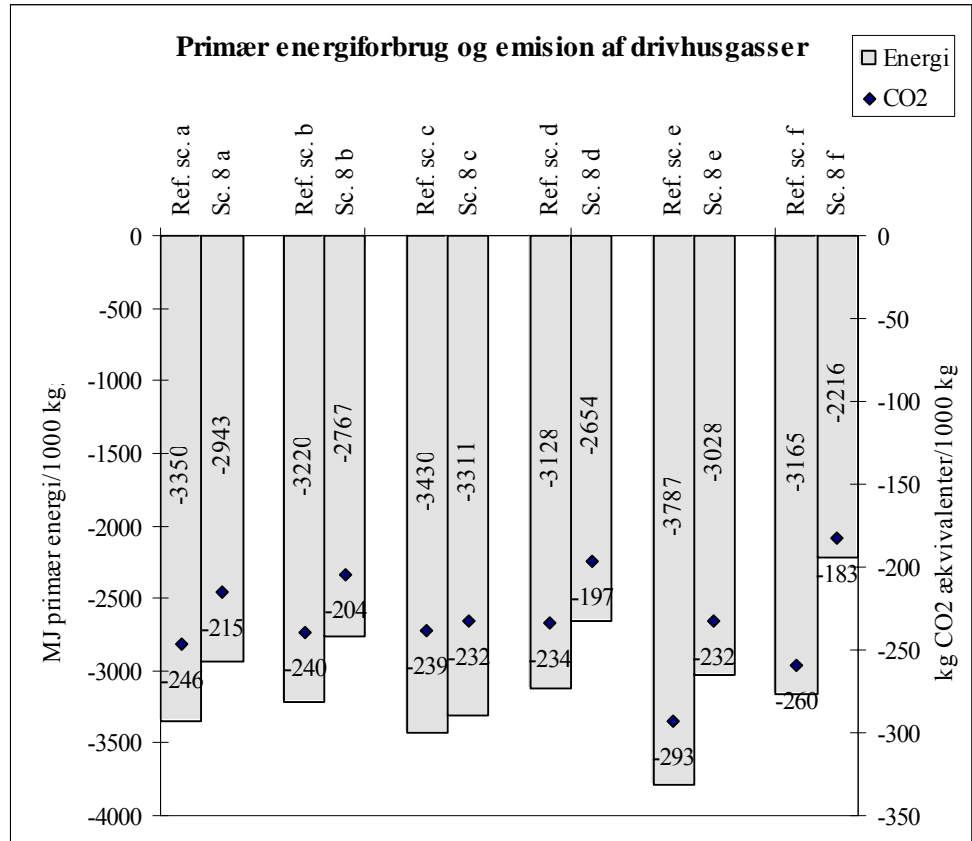
Forbrændingsanlæg	enhed	Varmtvands anlæg
		Forbrændingsanlæg, Modifieret
Egetforbrug af el	kWh/ton	70
Egetforbrug af varme	GJ/ton	0
Energivirkningsgrad	%	80
Elvirkningsgrad (af indfyret)	%	0
Varmevirkningsgrad (af indfyret)	%	80
Olieforbrug per ton	l/ton	0

Resultaterne indikerer en klar forringelse ved forbrændingsscenariet på hele 30 % for både energi og drivhusgasser. Biogasscenarierne får en forringelse på mellem 4 og 20 % i forhold til referencescenariet, værst for scenario e. Scenario c er derimod ikke følsom overfor energiudnyttelsen på forbrændingsanlægget, da kun en meget lille del forbrændes som rejekt. Scenario c er den mest fordelagtige løsning og fordelten til bioforgasning er på ca. 40 % for scenario c i forhold til forbrænding, hvor elektricitet ikke produceres, Figur 2-25.

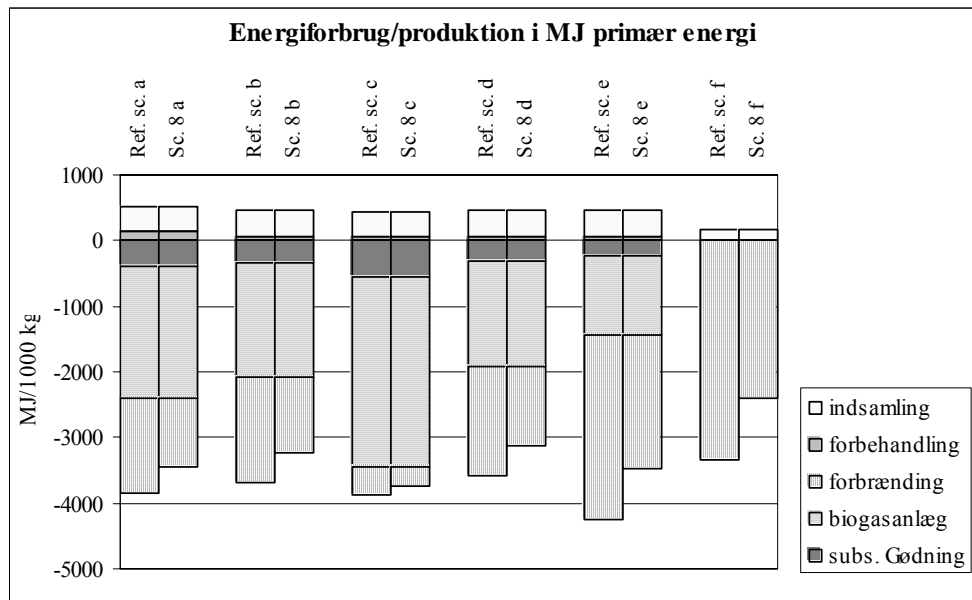
Det kan tilføjes, at energimæssig optimering af forbrændingskoncepterne er mulig, f.eks. ved røggaskondensering, hvor vanddamp kondenseres fra røggassen og derved frigiver varme. På den måde øges energivirkningsgraden og dermed forbedres resultatet af forbrændingsscenariet.

Tabel 2-26: Resultater fra scenario 8, energiproduktion ved forbrænding

Energi [MJ]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
Sc. 8, a	130	-1990	0	-401	-1063	381	-2943
Sc. 8, b	72	-1731	0	-339	-1154	386	-2767
Sc. 8, c	72	-2896	0	-542	-316	371	-3311
Sc. 8, d	72	-1616	0	-301	-1198	389	-2654
Sc. 8, e	72	-1194	0	-241	-2047	382	-3028
Sc. 8, f	0	0	0	0	-2395	179	-2216
Drivhusgasser [kg CO <sub>2</sub> -ækv]	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
Sc. 8, a	11	-134	0	-33	-87	28	-215
Sc. 8, b	6	-117	0	-28	-94	29	-204
Sc. 8, c	6	-195	0	-44	-26	27	-232
Sc. 8, d	6	-109	0	-25	-98	29	-197
Sc. 8, e	6	-79	0	-20	-167	28	-232
Sc. 8, f	0	0	0	0	-196	13	-183



Figur 2-25: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 8, energiproduktion ved forbrændingsanlæg. Resultaterne for alle behandlinger forringes væsentligt i forhold til referencescenariet pga. den mindskede energivirkningsgrad ved forbrænding. Ændringen er størst for forbrændingsscenariet f og for biogasscenario 8, hvor der er en stor mængde rejekt.



Figur 2-26: Energiforbrug ved scenario 8, energiproduktion ved forbrændingsanlæg. Energiproduktionen ved forbrænding forringes væsentligt ved et varmtvandsanlæg i forhold til et kraftvarmeanlæg.

### 2.3.9 Energisubstitution baseret på hhv. kul og naturgas alene

I scenario 9 og 10 antages, at den eksterne energi, som forbruges og substitueres i affaldssystemet er produceret på hhv. stenkul og naturgas og ikke som i reference scenariet, hvor produktionen bygger på et landsgennemsnit. Tabel 2-27 viser forbruget af energikilder samt emissionen af CO<sub>2</sub> for produktion af elektricitet og fjernvarme for de 2 scenarier, og hvor allokeringen mellem el og varme er ved exergimetoden. Det ses, at den samlede energi, der indfyres er uændret, mens CO<sub>2</sub> emissionerne ændres. Scenarierne 9 og 10 har dermed ikke indflydelse på det primære energiforbrug men på udslippet af drivhusgasser.

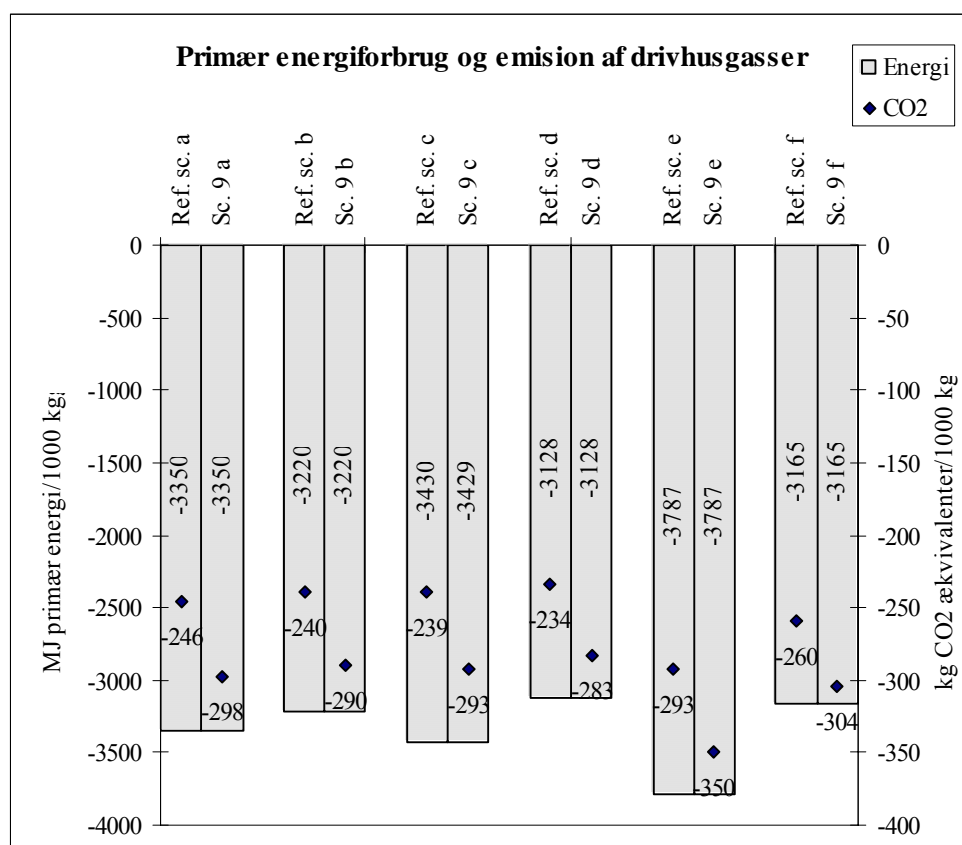
Tabel 2-27: Energideklaration for exergi allokeringmetode for scenario 9 og 10 (Energi E2 og Energistyrelsen, 2002)

<b>Energideklaration</b>	Scenario 9, kul	Scenario 10, naturgas
Forbrug per MJ el	g/MJ el	g/MJ el
Kul	1.811	0
Olie	0	0
Naturgas	0	1.811
Orimulsion	0	0
Biomasse	0	0
Affald	0	0
Energi ind total	1.811	1.811
Emissioner per MJ el		
CO <sub>2</sub>	172	103
Forbrug per MJ varme	g/MJ varme	g/MJ varme
Kul	0.877	0
Olie	0	0
Naturgas	0	0.877
Orimulsion	0	0
Biomasse	0	0
Affald	0	0
Energi ind total	0.877	0.877
Emissioner per MJ varme		
CO <sub>2</sub>	83	50

Resultaterne viser, pga. den væsentlige energiproduktion i affaldssystemet, at der undgås størst udslip af drivhusgasser, når den eksterne energi er baseret på kulkraft. Det skyldes, at kul har et større udslip af CO<sub>2</sub> per indfyret energi end naturgas. Udslippet af CO<sub>2</sub> er for kul 95 kg/GJ mens for naturgas er værdien 56,9 kg/GJ (Energistyrelsen, 2000). Det betyder, at kul bør substitueres ved energiproduktion frem for naturgas, som er en renere energikilde. Energiproduktion ændrer dog ikke ved prioriteringen mellem forbehandlingsteknologierne og forbrænding, da emissionen af CO<sub>2</sub> har ens betydning for alle beregninger.

Tabel 2-28: Resultater fra scenario 9, energiproduktion ved kul

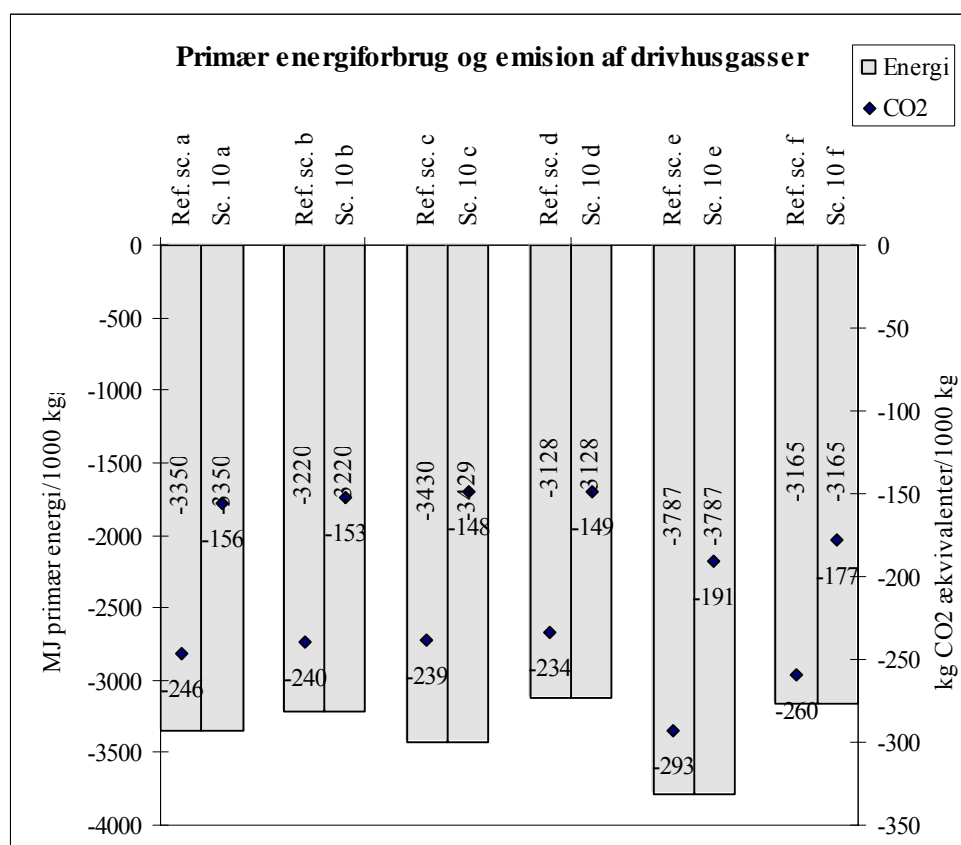
<b>Energi [MJ]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
<b>Sc. 9, a</b>	130	-1989	0	-401	-1470	381	-3350
<b>Sc. 9, b</b>	72	-1731	0	-339	-1608	386	-3220
<b>Sc. 9, c</b>	72	-2895	0	-542	-434	371	-3429
<b>Sc. 9, d</b>	72	-1615	0	-301	-1672	389	-3128
<b>Sc. 9, e</b>	72	-1194	0	-241	-2806	382	-3787
<b>Sc. 9, f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser [kg CO<sub>2</sub>-ækv]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
<b>Sc. 9, a</b>	12	-161	0	-38	-140	28	-298
<b>Sc. 9, b</b>	7	-140	0	-32	-153	29	-290
<b>Sc. 9, c</b>	7	-234	0	-52	-41	27	-293
<b>Sc. 9, d</b>	7	-131	0	-29	-159	29	-283
<b>Sc. 9, e</b>	7	-95	0	-23	-267	28	-350
<b>Sc. 9, f</b>	0	0	0	0	-318	13	-304



Figur 2-27: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 9, energiproduktion ved kul. De undgåede emissioner af drivhusgasser øges væsentligt i forhold til referencescenariet pga. substitution af energi baseret udelukkende på kul, som har en stor emission af CO<sub>2</sub> per energienhed.

Tabel 2-29: Resultater fra scenario 10, energiproduktion ved naturgas

<b>Energi [MJ]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total energi
<b>Sc. 10, a</b>	130	-1989	0	-401	-1470	381	-3350
<b>Sc. 10, b</b>	72	-1731	0	-339	-1608	386	-3220
<b>Sc. 10, c</b>	72	-2895	0	-542	-434	371	-3429
<b>Sc. 10, d</b>	72	-1615	0	-301	-1672	389	-3128
<b>Sc. 10, e</b>	72	-1194	0	-241	-2806	382	-3787
<b>Sc. 10, f</b>	0	0	0	0	-3344	179	-3165
<b>Drivhusgasser [kg CO<sub>2</sub>-ækv]</b>	forbehand- ling	biogasanlæg	lagring	subs. gødning	forbrænding	indsamling + transport	total CO <sub>2</sub>
<b>Sc. 10, a</b>	7	-85	0	-23	-84	28	-156
<b>Sc. 10, b</b>	4	-74	0	-19	-92	29	-153
<b>Sc. 10, c</b>	4	-124	0	-31	-25	27	-148
<b>Sc. 10, d</b>	4	-69	0	-17	-95	29	-149
<b>Sc. 10, e</b>	4	-50	0	-14	-160	28	-191
<b>Sc. 10, f</b>	0	0	0	0	-191	13	-177

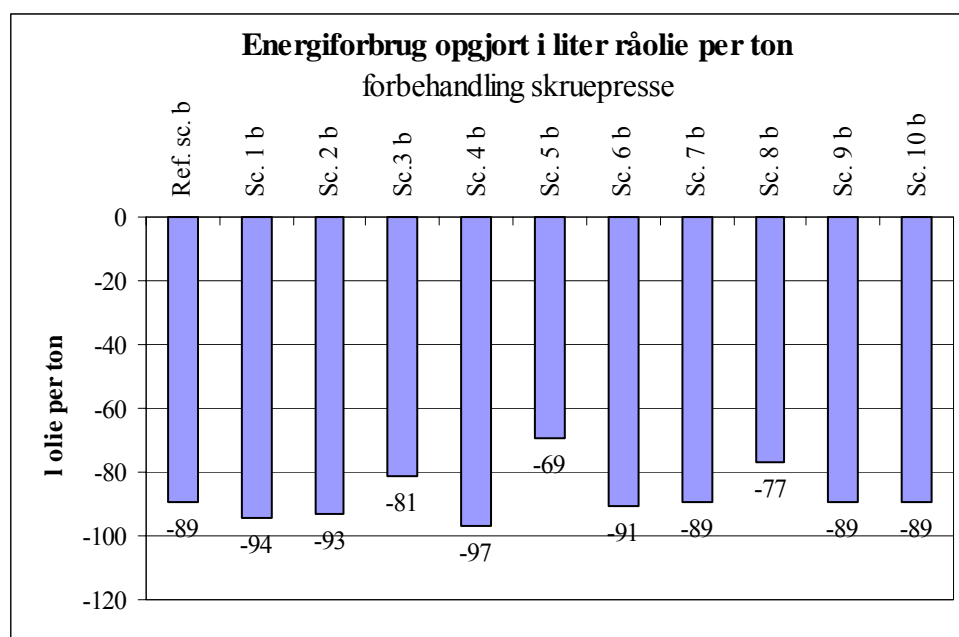


Figur 2-28: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser ved scenario 10, energiproduktion ved naturgas. De mindskede undgåede emissioner af drivhusgasser opstår fordi, naturgas har en lavere emission af CO<sub>2</sub> per energienhed end gennemsnitlige danske energiproduktion. Energieresultaterne er dog ikke ændret.

## 2.4 Sammenfatning af scenarieberegninger

Figur 2-29 viser resultaterne på tværs af scenarierne med forbehandling på en skrueseperator, som den foregår i Vaarst-Fjellerad.





Figur 2-29: Samlet oversigt over energiforbrug per 1000 kg kildesorteret organisk dagrenovation for bioforgasning med forbehandling på skrueseparator for referencescenariet samt for 10 forskellige scenarier.

De vigtigste parametre for et effektivt affaldssystem for bioforgasning, er:

- En effektiv forbehandling som fører TS og VS til forbrænding og vand til biogasanlægget
- En kildesortering som sikrer at den tørre del af det organiske dagrenovation føres til forbrænding (scenario 1), hvor energigevinsten er størst.
- En effektiv nedbrydning af glødetabet i biogasanlægget (scenario 4), således, at gasudbyttet er størst muligt.
- Biogassen udnyttes bedst muligt med produktion af både el og varme.

Derudover kan det konkluderes at:

- Energiforbruget ved indsamling ikke har væsentlig indflydelse
- Meget lange transportafstande (150 km) har nogen om end kun mindre betydning.
- Reduktion af udslip af metan fra gasmotor og efterlagring har nogen om end kun mindre betydning.
- Bioforgasning er klar fordelagtig både energimæssigt og mht. emission af drivhusgasser hvis den alternative forbrænding foregår uden elproduktion.
- Energisubstitution baseret på kul og naturgas har stor betydning for den samlede undgåede emission af drivhusgasser, men det ændrer dog ikke på prioriteringen, da virkningen stort set er ens for bioforgasning og forbrænding.

## 2.5 Sammenligning af affaldssammensætninger

Til beregning for affaldssammensætninger, som de er indsamlet i de 5 områder, er foretaget under samme antagelser, som referencescenariet i ovenstående beregninger. Dvs. beregninger ikke nødvendigvis repræsenterer et eksisterende system.

Sammenligning af resultater på tværs af affaldssammensætningerne med udgangspunkt i organisk dagrenovation fra de 5 involverede områder i Miljøstyrelsens basisdokumentation viser store forskelle i energi såvel som emission af drivhusgasser. Disse forskelle beror hovedsageligt i forskellige tørstofindhold i affaldet (Tabel 2-30), hvor affald med højt tørstofindhold giver de højeste energiproduktioner både ved bioforgasning og ved affaldsforbrænding, Figur 2-30. Prøvetagningen har antydnet, at affaldet fra de 4 områder (Affald fra Grindsted er ikke blevet kørt til Herning og Vaarst-Fjellerad til forbehandling) bliver fordelt forskelligt på de 2 eksisterende forbehandlingsmetoder: Rullesigte og skrueseparator. Andelen af de relevante parametre, som føres til biogasanlægget fra forbehandlingen, for de 4 typer affald og 2 forbehandlingsmetoder ses i Tabel 2-31. Det har medført gennemsnitlige rejktmængder på:

Hovedstaden-Rullesigte:	30,6 %
Kolding-Rullesigte:	41,2 %
Vejle-Rullesigte:	32,1 %
Ålborg-Rullesigte:	31,1 %
Hovedstaden-Skrueseparator:	43,1 %
Kolding-Skrueseparator:	46,7 %
Vejle-Skrueseparator:	49,4 %
Ålborg-Skrueseparator:	40,9 %
Grindsted-uden forbehandling	0 %

Tabel 2-30: Kemisk sammensætning af affald indsamlet i Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, Ålborg og Grindsted (beregnet på grundlag af Christensen, m.fl., 2002).

<b>Kemisk sammensætning af organisk dagrenovation fra 5 områder</b>						
	enhed	Hovedstaden	Kolding	Vejle	Ålborg	Grindsted
Tørstofindhold (TS)	%	29,9	33,6	33,8	31,3	32,3
Glødetab (VS)	% af TS	90,7	82,8	83,1	85,9	87,9
Nedre brændværdi	MJ/kg TS	19,3	18,1	18,1	18,5	18,8
Målt biogaspotentiale	l CH <sub>4</sub> /kg VS	450	450	450	450	450
<i>Næringsstoffer</i>						
N	% af TS	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
P	% af TS	0,41	0,38	0,39	0,35	0,41
K	% af TS	0,99	0,93	0,86	0,78	0,88

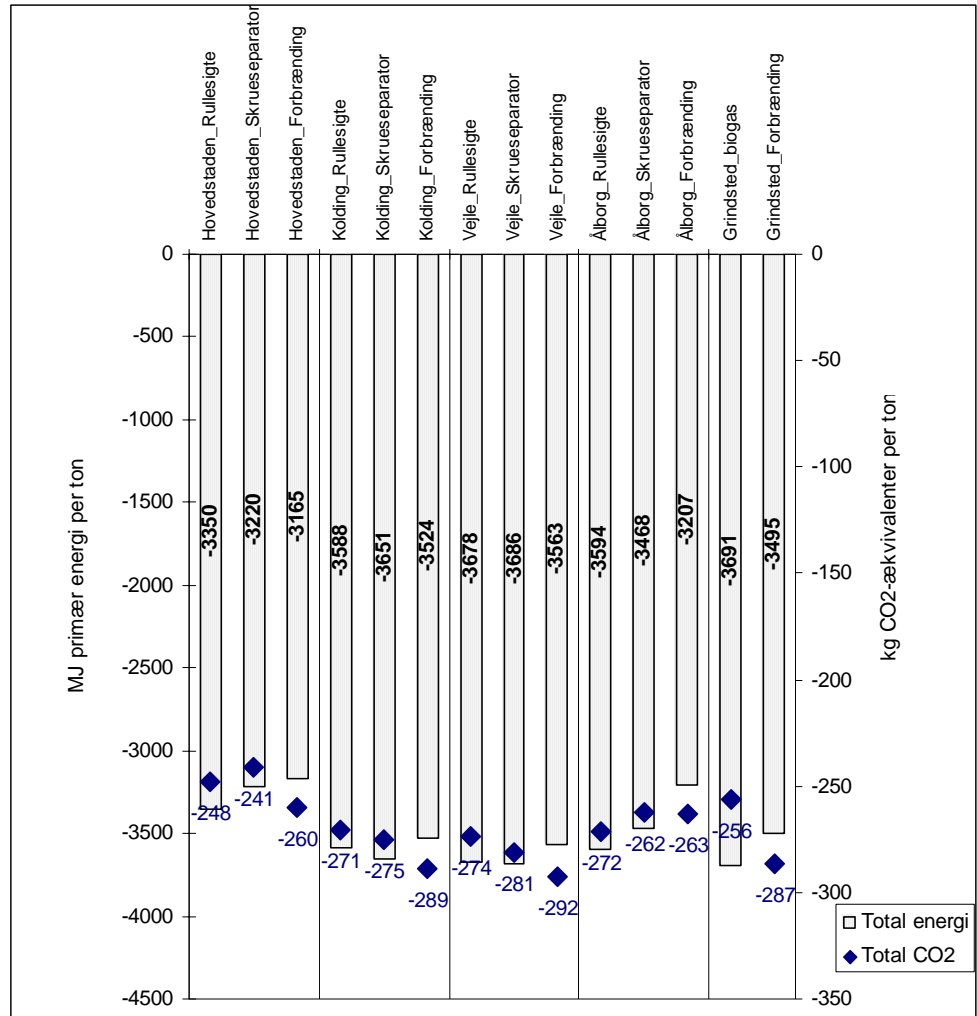
Tabel 2-31: Fordeling af kemiske parametre ved forbehandling til bioforgasning, værdi angiver andelen mellem 0 og 1 af parameteren, som føres i den forbehandlede biomasse til bioforgasning. Den resterende del af parameteren op til værdi 1 antages at bliver ført med rejekt til forbrænding (beregnet på grundlag af Christensen, m.fl., 2002).

<b>Fordeling ved forbehandling for 4 affaldstyper ved 2 forbehandlingsmetoder</b>						
Rullesigte	TS	H2O	VS	N	P	K
Hovedstaden	0,63	0,73	0,62	0,67	0,68	0,65
Kolding	0,54	0,66	0,53	0,56	0,66	0,58
Vejle	0,63	0,76	0,62	0,67	0,70	0,65
Ålborg	0,55	0,82	0,54	0,53	0,66	0,65
Skrueseperator	TS	H2O	VS	N	P	K
Hovedstaden	0,53	0,57	0,54	0,58	0,39	0,55
Kolding	0,54	0,68	0,55	0,58	0,48	0,61
Vejle	0,46	0,63	0,48	0,49	0,37	0,54
Ålborg	0,52	0,70	0,53	0,54	0,43	0,59

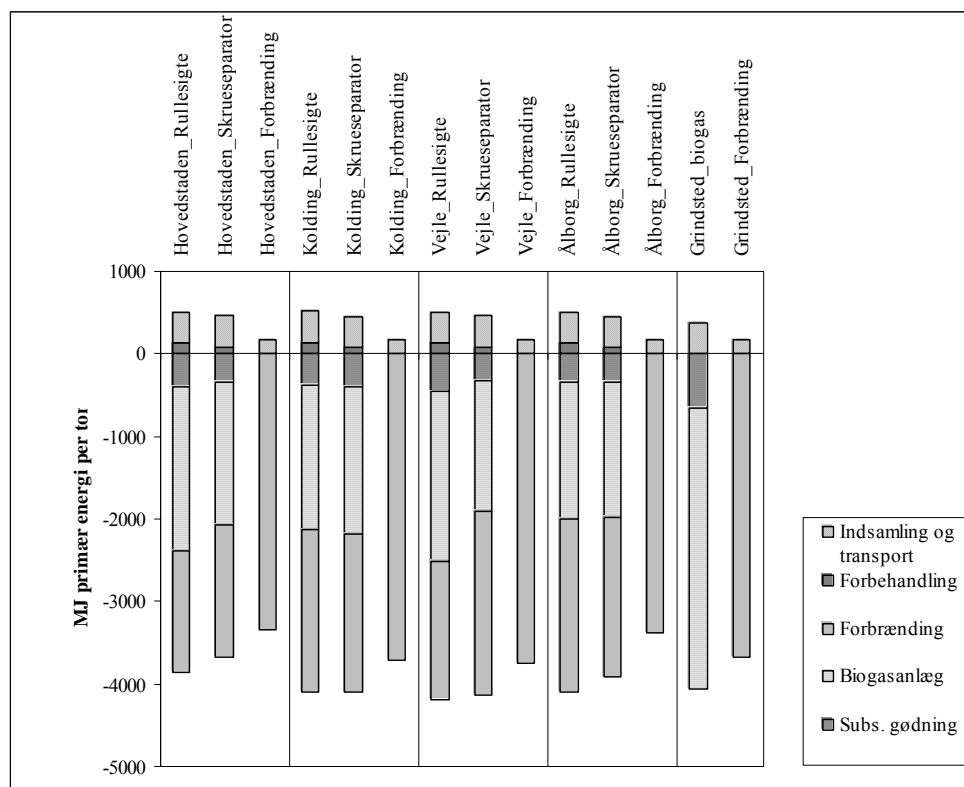
Resultaterne viser (Tabel 2-32 og Figur 2-30), at på trods af relative store forskelle i rejektmængder for en affaldstype, er resultaterne ikke nødvendigvis væsentlig forskellige. De største fordele ved bioforgasning i forhold til forbrænding opnås hovedsageligt ved affald fra Ålborg. Det skyldes for Ålborgs vedkommende, at store dele af vandindholdet i affaldet føres til biogasreaktoren og et tørt rejekt opnås. Dette sker især ved forbehandling på rullesigten.

Tabel 2-32: Resultater fra sammenligning af affaldssammensætninger

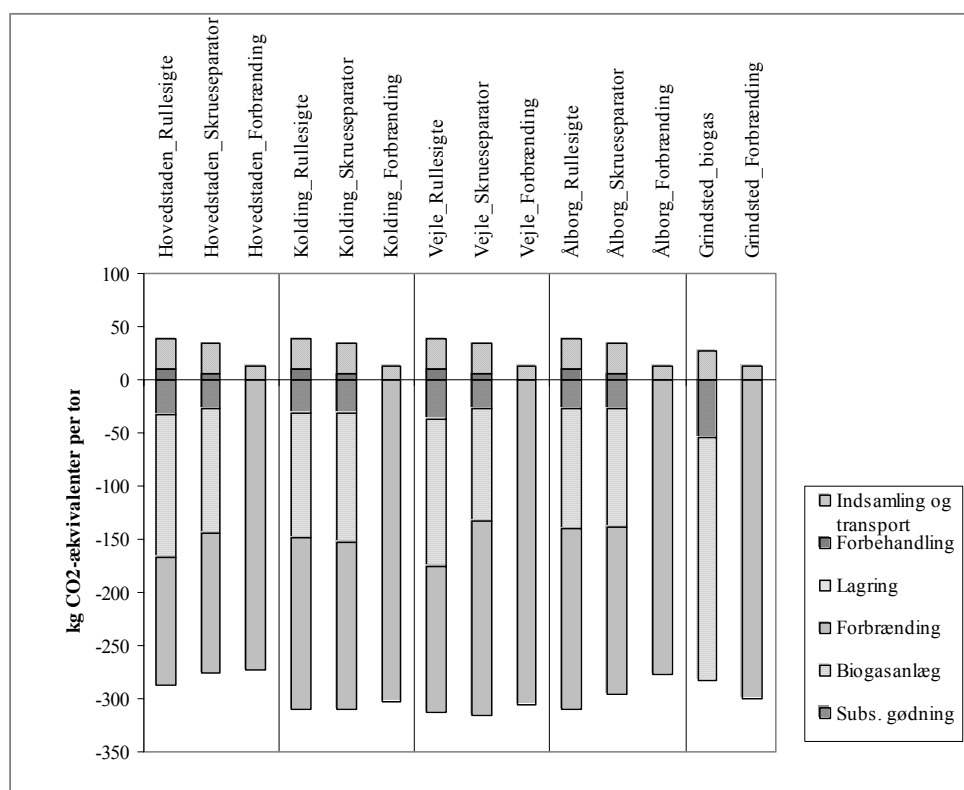
<b>MJ primær energi</b> <b>[MJ/ton]</b>	Forbehand- ling	Biogas- anlæg	Lagring	Subs. gødning	Forbræn- ding	Indsamling + transport	Total energi
Hovedstaden_Rullesigte	130	-1990	0	-401	-1470	381	-3350
Hovedstaden_Skrueseperator	72	-1731	0	-339	-1608	386	-3220
Hovedstaden_Forbrænding	0	0	0	0	-3344	179	-3165
Kolding_Rullesigte	130	-1734	0	-386	-1983	384	-3588
Kolding_Skrueseperator	72	-1795	0	-394	-1917	383	-3651
Kolding_Forbrænding	0	0	0	0	-3703	179	-3524
Vejle_Rullesigte	130	-2056	0	-455	-1677	380	-3678
Vejle_Skrueseperator	72	-1569	0	-331	-2243	386	-3686
Vejle_Forbrænding	0	0	0	0	-3742	179	-3563
Ålborg_Rullesigte	130	-1667	0	-341	-2097	380	-3594
Ålborg_Skrueseperator	72	-1649	0	-340	-1934	383	-3468
Ålborg_Forbrænding	0	0	0	0	-3387	179	-3207
Grindsted_bioforgasning	0	-3399	0	-659	0	368	-3691
Grindsted_forbrænding	0	0	0	0	-3674	179	-3495
<b>Drivhusgasser</b> <b>[kg CO<sub>2</sub>-ækv.]</b>	Forbehand- ling	Biogas- anlæg	Lagring	Subs. gødning	Forbræn- ding	Indsamling + transport	Total CO <sub>2</sub>
Hovedstaden_Rullesigte	11	-134	0	-33	-120	28	-248
Hovedstaden_Skrueseperator	6	-117	0	-28	-131	29	-241
Hovedstaden_Forbrænding	0	0	0	0	-273	13	-260
Kolding_Rullesigte	11	-117	0	-31	-162	28	-271
Kolding_Skrueseperator	6	-121	0	-32	-156	28	-275
Kolding_Forbrænding	0	0	0	0	-302	13	-289
Vejle_Rullesigte	11	-138	0	-37	-137	28	-274
Vejle_Skrueseperator	6	-106	0	-27	-183	29	-281
Vejle_Forbrænding	0	0	0	0	-305	13	-292
Ålborg_Rullesigte	11	-112	0	-28	-171	28	-272
Ålborg_Skrueseperator	6	-111	0	-28	-158	28	-262
Ålborg_Forbrænding	0	0	0	0	-276	13	-263
Grindsted_bioforgasning	0	-230	0	-54	0	27	-256
Grindsted_forbrænding	0	0	0	0	-300	13	-287



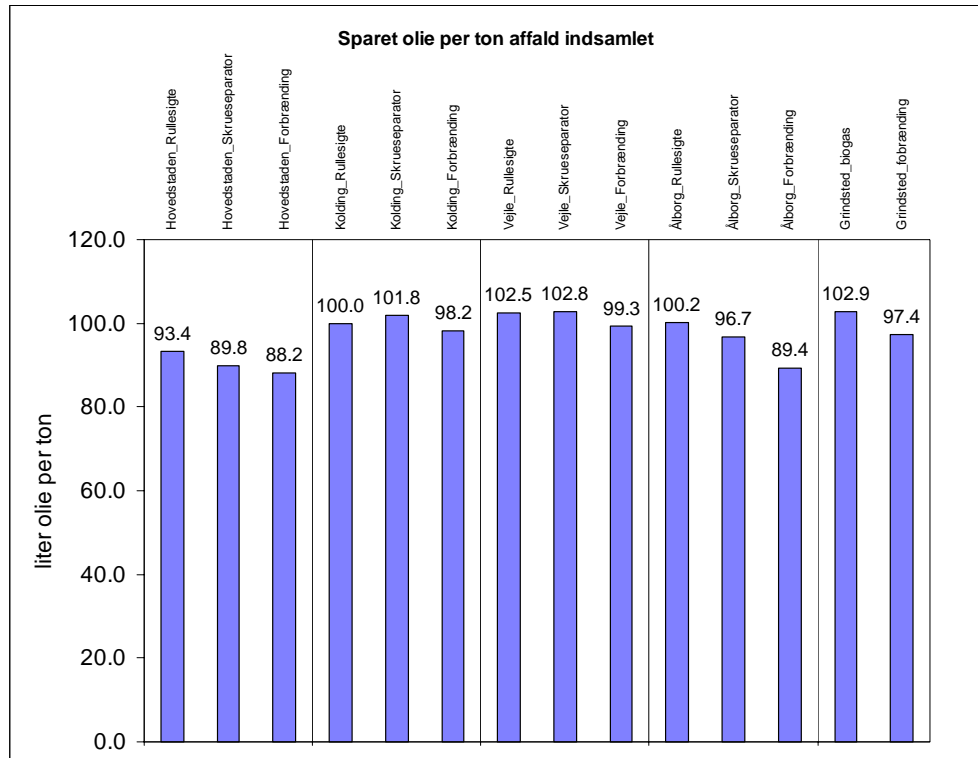
Figur 2-30: Energiforbrug og emissioner af drivhusgasser per ton affald indsamlet i for bioforgasning med 2 typer forbehandling for 4 typer affald samt for Grindsted uden forbehandling og forbrænding for alle områder.



Figur 2-31: Energiforbrug fordelt på delprocesser for bioforgasning med 2 typer forbehandling og forbrænding per ton affald indsamlet i de 5 områder.



Figur 2-32: Emission af drivhusgasser fordelt på delprocesser for bioforgasning med 2 typer forbehandling og forbrænding per ton affald indsamlet i de 5 områder.



Figur 2-33: Energiforbrug opgjort i liter råolie per ton for bioforgasning med 2 typer forbehandling og forbrænding for affald indsamlet i de 5 områder.



### 3. Referencer

Bek nr. 49, 2000: *Bekendtgørelse nr. 49 af 20/01/2000, Bekendtgørelse om anvendelse af affaldsprodukter til jordbrugsformål (slambekendtgørelsen)*, Energi- og Miljøministeriet

Bek nr. 877, 1998: *Bekendtgørelse nr 877 af 10/12/1998, Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold, husdyrgødning, ensilage m.v.*, Miljø- og Energiministeriet

Bundgaard, S; Carlsbæk, M; Juul, U; Ege Jørgensen, C, 1993: *Jordbrugsmæssig værdi af produkter fra organisk dagrenovation*, Arbejdsrapport nr. 64, Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen

Christensen, Thomas H.; Jørgensen, Orla; Jansen, Jes la Cour, 2002: *"Datarapport om sammensætning og biogaspotentialer af kildesorteret organisk dagrenovation"*, udarbejdet for Miljøstyrelsen af Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, PlanEnergi og Lunds Tekniska Högskola, 2002.

Energi E2, 2000: *Livscyklusvurdering af dansk el og kraftvarme*, Energi E2 a/s, Ekraft System, Elfor, Elsam, Eltra.

Eleazer, W.E., W.S. Odle, Y-S Wang and M.A. Barlaz, 1997: *Biodegradability of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills*, Environmental Science & Technology, 31, 911-917

Energistyrelsen, 2001: *Energistatistik 2000*

Hauschild, M, Wenzel, H. (1997): *Environmental assessment of products, vol 2: Scientific background*, Chapham & Hall, London 1997

Herning Kommunale Værker, 1993: *Behandling af kildesorteret dagrenovation på Sinding Biogafællesanlæg*

I/S Vestforbrænding, 2002: *Grønt regnskab 2001*, Glostrup

I/S Amagerforbrænding, 2001: *Miljøredegørelse 2000*, København

la Cour Jansen, 1996: *Nordsjællands Biogasanlæg I/S, Uvildig undersøgelse af fremtidsperspektiverne for Nordsjællands Biogasanlæg*, maj 1996

Lide, David R., 1992: *Handbook of chemistry and physics, 73<sup>rd</sup> edition 1992-1993*, CRC Press

Vrgoc, Marko; Hansen, Sune Balle; Forti, Massimo, 2002: *Indledende kortlægning af affaldshåndteringsystemet i Århus Kommune*, specialkursus v. Miljø & Ressourcer, DTU, Lyngby



Miljøstyrelsen, 2001: *Orientering fra Miljøstyrelsen, nr. 14, Affaldsstatistik 2000*, Miljøministeriet

Møller, H.; Baadstorp, L.; Ottosen, L. M.; Tønning, K.; Ørtenblad, H., 1999: *Miljøprojekt 386: Indsamling og anvendelse af organisk dagrenovation i biogasanlæg, Miljø, teknik og økonomi: Statusrapport*, Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen

Teknologisk Institut, 2001: *SEEK, Simulering af Energiforbrug og Emissioner med variabel Køretøjskonfiguration*, (EDB program)

Tønning, K.; Ottosen, L.M.; Malmgren-Hansen, B; Petersen, C.; Skovgaard, M., 1997: *Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, Genanvendelse af dagrenovation – miljømæssig og økonomisk vurdering*, Arbejdsrapport nr. 85, Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen

Wenzel, H; Hauschild, M.; Alting, L, 1997: *Environmental Assessment of Products – vol. 1: Methodology, tools and case studies in product development*, Chapham & Hall, London 1997

J. de Wit, B. Karl, M. Nielsen, P. G. Kristensen, 1998: *Emission and Reduction of Organic Flue Gas Components from Lean-Burn Gas Engines*, Danish Gas Technology Centre a/s, Denmark, International Gas Research Conference.

**Tabelliste:**

Tabel 1-1: Farvekode i model (kan ikke ses i sort/hvid print).....	16
Tabel 1-2: Input af affaldsmængder .....	17
Tabel 1-3: Input for affaldstyper og metodevalg.....	18
Tabel 1-4: Input valg for affaldstyper og behandlingsteknologier .....	19
Tabel 1-5: Input af transportafstande.....	20
Tabel 1-6: Grundlæggende forudsætninger (Parametre mærket med * anvendes ej til beregninger) .....	21
Tabel 1-7: Affaldskarakterisering af kildesorteret organisk dagrenovation ved forskellige metoder til kildesortering (pt. bliver parametrene for TS, VS, brændværdi, biogaspotentiale, samt næringsstofferne N, P og K anvendt til beregningerne, * anvendes ej). .....	22
Tabel 1-8: Bebyggelsestyper og dieselforbrug for traditionel og separat affaldsindsamling .....	23
Tabel 1-9: Indsamlingsparametre til transport mellem indsamlingsområde og behandlingsanlæg .....	23
Tabel 1-10: Tekniske specifikationer for forbehandling .....	24
Tabel 1-11: Fordeling af kildesorteret dagrenovation til forbehandlet kildesorteret dagrenovation og rejekt ved hydraulisk skruepresse og rullerigt (* markerer parametre som ikke anvendes til beregninger) .....	26
Tabel 1-12: Beregning af affaldsparametre til rejekt og forbehandlet affald ud fra en given affaldssammensætning og forbehandlingsmetode (* parametre som ikke anvendes til beregninger).....	27
Tabel 1-13: Tekniske specifikationer for biogasanlæg (bemærk opholdstiden for affaldet i reaktoren anvendes ikke pt. til beregninger i modellen) .....	28
Tabel 1-14: Beregning af bundfald og flydestof fra biogasanlægget (parametre mærket med * anvendes ikke til beregninger) .....	29
Tabel 1-15: Udgående strømme fra biogasanlæg.....	31
Tabel 1-16: Tekniske specifikationer for gasmotor.....	31
Tabel 1-17: Energiberegninger ved biogasanlægget .....	32
Tabel 1-18: Tekniske specifikationer for efterlagring af gødningssvæske (Bemærk, kun omsætningsgraden af potentiel produktion og om afbrænding af metan anvendes i de videre beregninger, areal af tank beregnes; * anvendes parametre ikke til beregninger) .....	33
Tabel 1-19: Beregninger af metan emission og TS og VS indhold ved lagring af gødningssvæske ved en given lagring (bemærk kun ”Glødetab omsat” har pt. indflydelse på metanemissionen ved efterlagring; * anvendes parametre ikke til beregninger) .....	34
Tabel 1-20: Definition på anvendelser af fiberfraktion .....	34
Tabel 1-21: Beregning af fiberfraktion til mark og forbrænding (eks. 50 % til jordbrug og 50 % til forbrænding).....	35
Tabel 1-22: Tekniske specifikationer på forbrændingsanlæg.....	36
Tabel 1-23: Energiberegninger ved affaldsforbrænding .....	36

Tabel 1-24: Brændselsforbrug til transport (UMIP; 1998, bemærk 40 % lastudnyttelse på lille lastbil og 70 % lastudnyttelse på stor lastbil) .....	37
Tabel 1-25: Beregninger af brændselsforbrug til transport .....	37
Tabel 1-26: Metoder til allokering af energiproduktion (Energ E2, 2000, Emissioner mærket med * anvendes ikke i beregninger).....	38
Tabel 1-27: System antagelser.....	39
Tabel 1-28: Massestrømme for hver substans i de enkelte enhedsprocesser i affaldssystemet .....	40
Tabel 1-29: Energibalance fra de involverede enhedsprocesser i affaldssystemet.	42
Tabel 1-30: CO <sub>2</sub> emissioner fra de involverede enhedsprocesser i affaldssystemet	42
Tabel 1-31: Resultatoversigt for forbrug af energi for 5 typer affald, 2 typer forbehandling samt forbrænding .....	43
Tabel 1-32: Resultatoversigt for udslip af drivhusgasser for 5 typer affald, 2 typer forbehandling samt forbrænding .....	43
Tabel 1-33: Antagelser for scenarier som bliver sammenlignet i ”Resultat oversigt” .....	43
Tabel 1-34: Sparet primær energi opgjort i liter råolie per person per år ved en given affaldsproduktion per person per år .....	44
Tabel 2-1: Kemisk karakterisering af organisk dagrenovation fra Hovedstadsområdet .....	45
Tabel 2-2: Fordeling af kemiske parametre ved forbehandling til bioforgasning, værdi angiver andelen mellem 0 og 1 af parameteren, som føres i den forbehandlede biomasse til bioforgasning. Den resterende del af parameteren op til værdi 1 antages at bliver ført med rejekt til forbrænding .....	46
Tabel 2-3: Teknologier i affaldssystemet gældende for referencescenario .....	48
Tabel 2-4: Indsamlingsområde og dieselforbrug (Interne oplysninger DTU, 2002) .....	48
Tabel 2-5: Tekniske specifikationer ved biogasanlæg .....	48
Tabel 2-6: Tekniske specifikationer ved biogasmotor .....	49
Tabel 2-7: Tekniske specifikationer for affaldsforbrændingsanlæg.....	49
Tabel 2-8: Energideklaration for exergi allokeringemetode (Energ E2, 2000) .....	50
Tabel 2-9: Resultater for energi og udslip af drivhusgasser for reference scenario (1000 kg) .....	53
Tabel 2-10: Næringssalte tilført landbrugsjord i referencescenario samt andele af potentiale i kildesorteret organisk affald .....	56
Tabel 2-11: Mængder, TS og VS i referencescenario og i scenario 1 .....	57
Tabel 2-12: Resultater fra scenario 1: Ændrede kildesorteringkriterier.....	57
Tabel 2-13: Indsamlingsområde og dieselforbrug i scenario 2 .....	59
Tabel 2-14: Resultater fra scenario 2: Energiforbrug i indsamlingen .....	59
Tabel 2-15: Indsamlingsområde og dieselforbrug i scenario 3 .....	61
Tabel 2-16: Resultater fra scenario 3, transportafstand til biogasanlæg.....	61
Tabel 2-17: Tekniske specifikationer ved biogasanlæg i scenario 4 .....	63

Tabel 2-18: Resultater fra scenario 4: Øget biogasproduktion.....	63
Tabel 2-19: Tekniske specifikationer ved biogasmotor i scenario 5.....	65
Tabel 2-20: Resultater fra scenario 5: Energiproduktion af biogas.....	65
Tabel 2-21: Tekniske specifikationer ved biogasmotor i scenario 6.....	67
Tabel 2-22: Resultater fra scenario 6: Reduceret metanudslip fra gasmotor.....	68
Tabel 2-23: Tekniske specifikationer for efterlagring af gødningssvæske i sc. 7....	69
Tabel 2-24: Resultater fra scenario 7: Øget metanudslip fra efterlagring.....	69
Tabel 2-25: Tekniske specifikationer for affaldsforbrændingsanlæg i scenario 8 .	71
Tabel 2-26: Resultater fra scenario 8, energiproduktion ved forbrænding.....	71
Tabel 2-27: Energideklaration for exergi allokeringsmetode for scenario 9 og 10 (Energi E2 og Energistyrelsen, 2002) .....	73
Tabel 2-28: Resultater fra scenario 9, energiproduktion ved kul .....	74
Tabel 2-29: Resultater fra scenario 10, energiproduktion ved naturgas.....	75
Tabel 2-30: Kemisk sammensætning af affald indsamlet i Hovedstadsområdet, Kolding, Vejle, Ålborg og Grindsted (beregnet på grundlag af Christensen, m.fl., 2002). .....	77
Tabel 2-31: Fordeling af kemiske parametre ved forbehandling til bioforgasning, værdi angiver andelen mellem 0 og 1 af parameteren, som føres i den forbehandlede biomasse til bioforgasning. Den resterende del af parameteren op til værdi 1 antages at bliver ført med rejekt til forbrænding (beregnet på grundlag af Christensen, m.fl., 2002). .....	78
Tabel 2-32: Resultater fra sammenligning af affaldssammensætninger.....	78

### Figurliste:

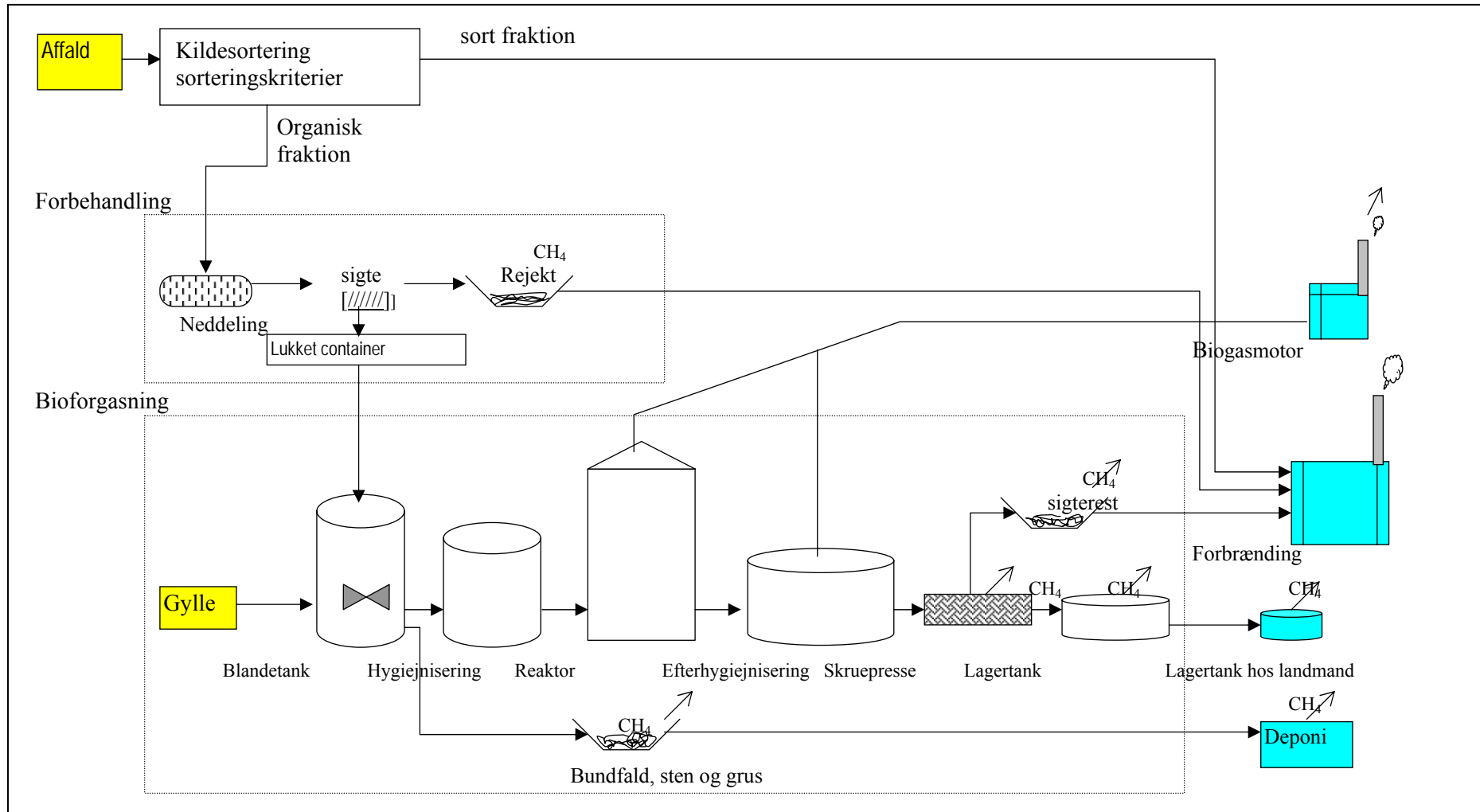
Figur 1-1: Grundprincip ved bioforgasning af kildesorteret organisk affald i Danmark .....	10
Figur 1-2: Procesdiagram i model af biogasproduktion (ikke fuldendt og kun som eksempel).....	15
Figur 1-3: Eksempel på massestrømme, våd vægt, for 1000 kg kildesorteret organisk dagrenovation .....	41
Figur 1-4: Eksempel på massestrømme for kvælstof for 1000 kg kildesorteret organisk dagrenovation .....	41
Figur 2-1: Scenarier og beregninger.....	47
Figur 2-2: Massestrømme for våd vægt for reference scenario b). Figuren viser at rejektmængden er på ca. 44 % og at biogassen udgør 88 kg per ton kildesorteret organisk dagrenovation til biogasanlæg. Der føres 444 kg til forbrænding og 464 kg gødningssvæske til landbruget. ....	50
Figur 2-3: Massestrømme for TS for reference scenario b). Figuren viser at rejektmængden er på ca. 47 % på TS basis og at biogassen udgør 88 kg TS per ton kildesorteret organisk dagrenovation til biogasanlæg. Der føres 141 kg TS til forbrænding og 69 kg TS i gødningssvæske til landbruget. ....	51

Figur 2-4: Massestrømme for vand for reference scenario b). Størstedelen af vand i kildesorteret organisk dagrenovation føres med gødningsvæsken til landbruget. Der føres dog en stor del, ca. 300 kg, fra forbehandlingen til forbrænding. ....	51
Figur 2-5: Massestrømme for VS reference scenario b). 88 kg VS omsættes til biogas og 36 kg føres videre ikke nedbrudt til landbruget. 125 kg VS føres fra forbehandling til forbrænding.....	51
Figur 2-6: Massestrømme for kvælstof for reference scenario b). Knap 6 kg kvælstof, N, som udgør ca. 56 %, føres til landbruget, hvor de resterende 44 % føres fra forbehandling til forbrænding. Der tages ikke i massestrømmene hensyn til afdampning af kvælstof i form af ammoniak. ....	52
Figur 2-7: Massestrømme for fosfor for reference scenario b). Fosfor fjernes i højere grad ved forbehandling end kvælstof og derfor føres kun ca. 39 % videre til landbrugsjorden, hvor de resterende 61 % føres fra forbehandling til forbrænding. Det skyldes fordelingen ved forbehandling ved forbehandling b), se Tabel 2-2. ....	52
Figur 2-8: Massestrømme for kalium for reference scenario b). Fordelingen af kalium følger billedet fra kvælstof strømmene. Ca. 55 % af det tilstedeværende kalium i kildesorteret organisk dagrenovation føres til landbrugsjorden. ....	52
Figur 2-9: Energiforbrug og emissioner af drivhusgasser for referencescenariet for bioforgasning med 5 typer forbehandling og forbrænding.....	54
Figur 2-10: Referencescenariet for primær energiforbrug angivet i MJ primær energi for hver enkelt delproces i affaldssystemet. Positive værdier er udtryk for et forbrug, mens negative værdier er udtryk for et undgået forbrug af primære energiressourcer fra energiproduktion i systemet. ....	55
Figur 2-11: Massestrømme for scenario 1b, ændret kildesortering. Det ses at 100 kg føres uden om forbehandling og 900 kg føres til forbehandling. ....	57
Figur 2-12: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 1: Ændret kildesortering. Både de undgåede energiressourcer og emission af drivhusgasser øges i scenario 1 i forhold til referencescenariet. ....	58
Figur 2-13: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 1: Ændre kildesorteringskriterier. ....	58
Figur 2-14: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 2, indsamling. Det mindre dieselforbrug i scenario 2 forbedrer resultaterne marginalt i forhold til referencescenariet. ....	60
Figur 2-15: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 2. Energi til indsamling næsten halveres i scenario 2 i forhold til referencescenariet. ....	60
Figur 2-16: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 3 i forhold til referencescenariet: Transportafstande til biogasanlæg. Resultaterne er forringede pga. den større kørselsafstand fra indsamlingsområde til biogasanlægget. ....	62
Figur 2-17: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 3. Energiforbruget til indsamling er næsten fordoblet i forhold til referencescenariet, ellers er de øvrige delprocesser uændrede. ....	62
Figur 2-18: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 4, øget nedbrydningsgrad af glødetab. Resultaterne forbedres i forhold til referencescenariet pga. den øgede nedbrydning af VS.....	64

Figur 2-19: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 4. Energiproduktion ved biogasanlægget øges i forhold til referencescenariet, men hvor de øvrige delprocesser er uændrede. ....	64
Figur 2-20: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 5, energiproduktion ved biogasmotor. Resultaterne i forhold til referencescenariet er væsentlig forringede pga. den lavere udnyttelsesgrad af biogassen. ....	66
Figur 2-21: Energiforbrug ved reference scenario og scenario 5. Den lavere energivirkningsgrad ved gasmotoren er årsagen til den lavere produktion....	67
Figur 2-22: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 6: Reduceret metanudslip ved gasmotor. Energiproduktionen er uændret i forhold til referencescenariet. Resultatet for drivhusgasser er marginalt forbedret pga. den lavere emission af uforbrændt metan fra gasmotoren.....	68
Figur 2-23: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 7: Øget metanudslip ved efterlagring. De undgåede emissioner af drivhusgasser mindskes i forhold til referencescenariet ved en ukontrolleret åben lagring af gødningsvæske. ....	70
Figur 2-24: Emission af drivhusgasser for scenario 7 og for referencescenariet. Efterlagring af gødningsvæske medfører et betydeligt bidrag til emission af drivhusgasser, hvorved resultatet for drivhusgasser forringes. ....	70
Figur 2-25: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 8, energiproduktion ved forbrændingsanlæg. Resultaterne for alle behandlinger forringes væsentligt i forhold til referencescenariet pga. den mindskede energivirkningsgrad ved forbrænding. Ændringen er størst for forbrændingsscenariet f og for biogasscenario 8, hvor der er en stor mængde rejekt.....	72
Figur 2-26: Energiforbrug ved scenario 8, energiproduktion ved forbrændingsanlæg. Energiproduktionen ved forbrænding forringes væsentligt ved et varmtvandsanlæg i forhold til et kraftvarmeanlæg. ....	72
Figur 2-27: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser for scenario 9, energiproduktion ved kul. De undgåede emissioner af drivhusgasser øges væsentligt i forhold til referencescenariet pga. substitution af energi baseret udelukkende på kul, som har en stor emission af CO <sub>2</sub> per energienhed.....	74
Figur 2-28: Energiforbrug og udslip af drivhusgasser ved scenario 10, energiproduktion ved naturgas. De mindskede undgåede emissioner af drivhusgasser opstår fordi, naturgas har en lavere emission af CO <sub>2</sub> per energienhed end gennemsnitlige danske energiproduktion. Energiresultaterne er dog ikke ændret. ....	75
Figur 2-29: Samlet oversigt over energiforbrug per 1000 kg kildesorteret organisk dagrenovation for bioforgasning med forbehandling på skrueseparator for referencescenariet samt for 10 forskellige scenarier. ....	76
Figur 2-30: Energiforbrug og emissioner af drivhusgasser per ton affald indsamlet i for bioforgasning med 2 typer forbehandling for 4 typer affald samt for Grindsted uden forbehandling og forbrænding for alle områder.....	79
Figur 2-31: Energiforbrug fordelt på delprocesser for bioforgasning med 2 typer forbehandling og forbrænding per ton affald indsamlet i de 5 områder.....	80
Figur 2-32: Emission af drivhusgasser fordelt på delprocesser for bioforgasning med 2 typer forbehandling og forbrænding per ton affald indsamlet i de 5 områder.....	80

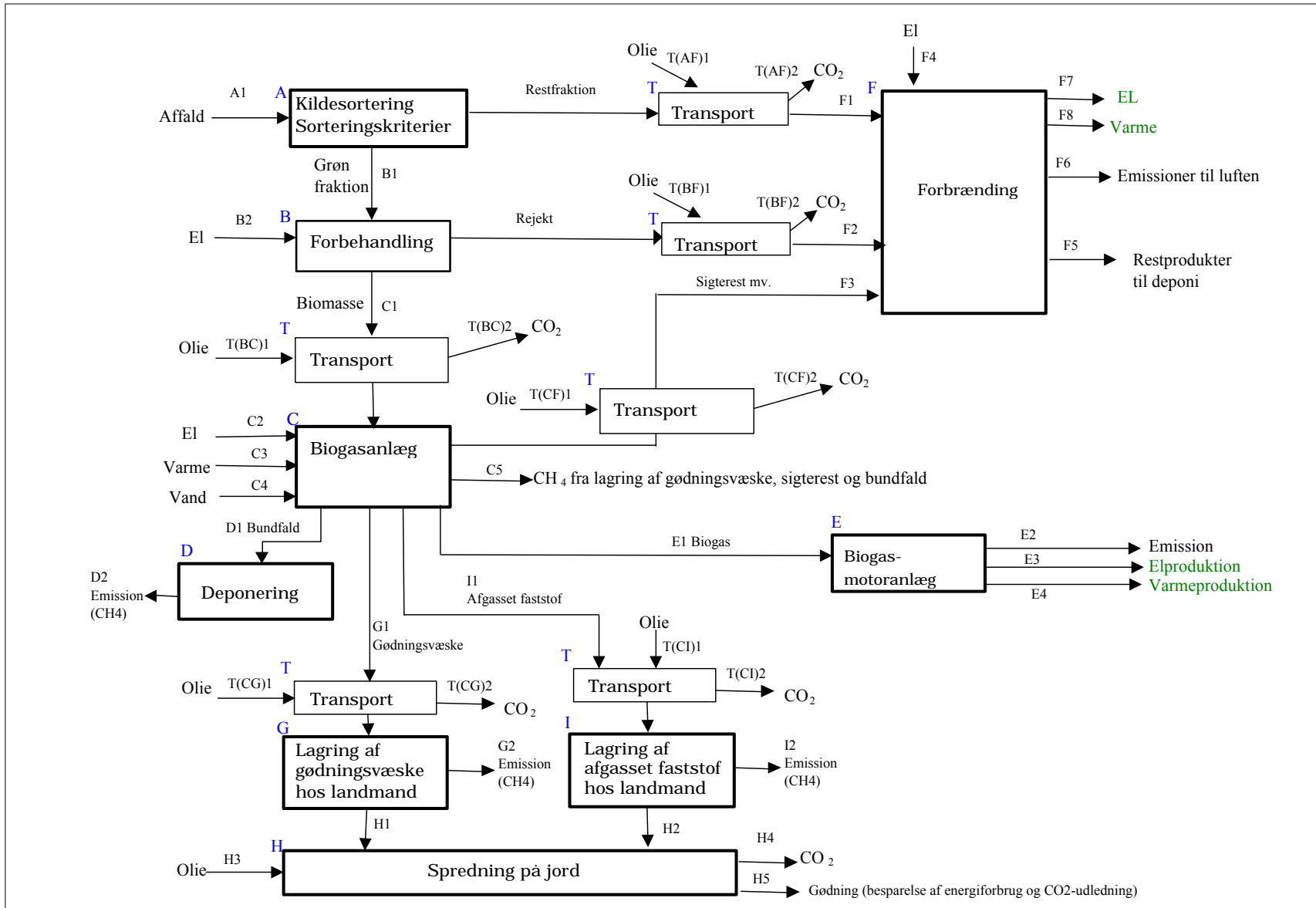
Figur 2-33: Energiforbrug opgjort i liter råolie per ton for bioforgasning med 2 typer forbehandling og forbrænding for affald indsamlet i de 5 områder. .... 81

# Appendiks A: Systemfigur



Mulige metanudslip ved: 1) Bundfald efter blandetank, afhængig af det organiske indhold, både på anlægget og på deponi; 2) Sigterest til forbrænding (organisk indhold, er den overdækket og hvor ofte tømmes den?); 3) Lagertanken (er den overdækket og hvor ofte tømmes den?); 4) Lagertanke ved landmændene





Systemafgrænsning i DTU-Biogasmødelen, vs. 1.00

# Appendiks B: Navngivning af processer og affaldstyper

Tabel fra modellen ark "Forudsætninger, niveau 4.1".

Overordnet karakterisering af metoder	Beskrivelse	Navn i program	Navn
<b>A: Kildesortering</b>			
Kildesortering, Metode 1	Kildesortering som i København, papirposer	A.met1	Kildesortering, Metode 1
Kildesortering, Metode 2	Kildesortering som i Kolding plasticposer	A.met2	Kildesortering, Metode 2
Kildesortering, Metode 3	Kildesortering som i Vejle plasticposer	A.met3	Kildesortering, Metode 3
Kildesortering, Metode 4	Kildesortering som i Ålborg plasticposer	A.met4	Kildesortering, Metode 4
Kildesortering, Metode 5	Kildesortering som i X-købing papirposer	A.met5	Kildesortering, Metode 5
Kildesortering, Default	Grøn rest fraktion	A.default	Grøn rest fraktion
<b>Affaldstyper</b>			
Organisk fraktion	Kildesorteret organisk dagrenovation	b.1	
Affaldstype 1	evt. slagteriaffald	afftyp1	Affaldstype 1
Affaldstype 2	affald 2	afftyp2	Affaldstype 2
Affaldstype 3	affald 3	afftyp3	Affaldstype 3
Affaldstype 4	affald 4	afftyp4	Affaldstype 4
Affaldstype 5	affald 5	afftyp5	Affaldstype 5
Affaldstype 6	affald 6	afftyp6	Affaldstype 6
Affaldstype 7	affald 7	afftyp7	Affaldstype 7
Affaldstype 8	affald 8	afftyp8	Affaldstype 8
Affaldstype 9	affald 9	afftyp9	Affaldstype 9
Affaldstype10	Gylle	afftyp10	Affaldstype10
<b>B: Forbehandling</b>			
Forbehandling, Metode 1	Rullesigte	B.met1	Forbehandling, Metode 1
Forbehandling, Metode 2	Hydraulisk skruepresse	B.met2	Forbehandling, Metode 2
Forbehandling, Metode 3	forb 3	B.met3	Forbehandling, Metode 3
Forbehandling, Metode 4	forb.4	B.met4	Forbehandling, Metode 4
Forbehandling, Metode 5	forb.5	B.met5	Forbehandling, Metode 5
Forbehandling, Default	Default forbehandling	B.default	Forbehandling, Default

<b>C: Biogasanlæg</b>			
Biogasanlæg, Metode 1	Grindsted, mesofil, efterseparering	C.met1	Biogasanlæg, Metode 1
Biogasanlæg, Metode 2	Herning, termofil, ingen efterseparering	C.met2	Biogasanlæg, Metode 2
Biogasanlæg, Metode 3	Vaarst-Fjellerad, termofil, ingen efterseparering	C.met3	Biogasanlæg, Metode 3
Biogasanlæg, Metode 4	biogas4	C.met4	Biogasanlæg, Metode 4
Biogasanlæg, Metode 5	biogas5	C.met5	Biogasanlæg, Metode 5
Biogasanlæg, Default	Default biogasanlæg	C.default	Biogasanlæg, Default
<b>D: Deponering</b>			
Deponering, Metode 1	dep1	D.met1	Deponering, Metode 1
Deponering, Metode 2	dep2	D.met2	Deponering, Metode 2
Deponering, Default	Default deponering	D.default	Deponering, Default
<b>E: Biogasenergianlæg</b>			
Energianlæg, Metode 1	Grindsted, el	E.met1	Energianlæg, Metode 1
Energianlæg, Metode 2	Herning, el+varme	E.met2	Energianlæg, Metode 2
Energianlæg, Metode 3	Vaarst-Fjellerad, el+varme	E.met3	Energianlæg, Metode 3
Energianlæg, Default	Default energianlæg	E.default	Energianlæg, Default
<b>F: Forbrændingsanlæg</b>			
Forbrændingsanlæg, Metode 1	Kraftvarme anlæg	F.met1	Forbrændingsanlæg, Metode 1
Forbrændingsanlæg, Metode 2	Varmtvands anlæg	F.met2	Forbrændingsanlæg, Metode 2
Forbrændingsanlæg, Default	Forbrændingsanlæg, Default	F.default	Forbrændingsanlæg, Default
<b>G: Lagring af gødningsvæske hos landmænd</b>			
Lagring af gødningsvæske, Metode 1	Åben lagring	G.met1	Lagring af gødningsvæske, Metode 1
Lagring af gødningsvæske, Metode 2	Lagring med låg og opsamling og afbrænding af gasser	G.met2	Lagring af gødningsvæske, Metode 2
Lagring af gødningsvæske, Default	Default lagring af gødningsvæske	G.default	Lagring af gødningsvæske, Default
<b>H: Anvendelse af fiberfraktion</b>			
Anvendelse af fiberfraktion, metode 1	Anvendelse på mark	H.met1	Anvendelse af fiberfraktion, metode 1

Anvendelse af fiberfraktion, metode 2	Forbrænding	H.met2	1 Anvendelse af fiberfraktion, metode 2
Anvendelse af fiberfraktion, default	Default udspreddning på jord	H.default	2 Anvendelse af fiberfraktion, default
<b>I: Lagring af afgasset faststof</b>			
Lagring af afgasset faststof, Metode 1	Lagring fast stof 1	I.met1	Lagring af afgasset faststof, Metode 1
Lagring af afgasset faststof, Metode 2	Lagring fast stof 2	I.met2	Lagring af afgasset faststof, Metode 2
Lagring af afgasset faststof, Default	Default lagring af afgasset faststof	I.default	Default lagring af afgasset faststof
<b>S: Indsamling</b>			
Indsamling, Metode 1	Villa område	S.met1	Indsamling, Metode 1
Indsamling, Metode 2	Etagebebyggelse	S.met2	Indsamling, Metode 2
Indsamling, Metode 3	City område	S.met3	Indsamling, Metode 3
Indsamling, Metode 4	Landområde	S.met4	Indsamling, Metode 4
Indsamling, default	Blandet bebyggelse	S.default	Indsamling, default
<b>T: Transport</b>			
Transport, Metode 1	10 ton/læs	T.met1	Transport, Metode 1
Transport, Metode 2	20 ton/læs	T.met2	Transport, Metode 2
Transport, Metode 3	transport 3	T.met3	Transport, Metode 3
Transport, Default	Default transportmetode	T.default	Transport, Default
<b>M: Miljødeklaration af energisektor</b>			
Miljødeklaration, metode 1	Energimetoden	M.met1	Miljødeklaration, metode 1
Miljødeklaration, metode 2	Exergimetoden	M.met2	Miljødeklaration, metode 2
Miljødeklaration, metode 3	Varmevirkningsgrad	M.met3	Miljødeklaration, metode 3



# Appendiks C: VBA makrokode

## Microsoft Visual Basic kode for makro ”Visresult”

```
Sub Visresult()
```

```
Application.ScreenUpdating = False    'slukker skærm
```

```
SLETRESULT                            'sletter tidligere resultater
```

```
Sheets("Inddata, niveau1").Select  
If Cells(6, 5) > 0 Then
```

```
Cells(22, 3).Select  
ActiveCell.Value = "1"                'vælger affaldstype Hovedstadsområdet
```

```
Cells(23, 3).Select                    'vælger forbehandling rullesigte  
ActiveCell.Value = "1"
```

```
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
```

```
Sheets("Resultat Oversigt").Select
```

```
Cells(5, 4).Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False              'kopierer energiresultater
```

```
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
```

```
Sheets("Resultat Oversigt").Select
```

```
Cells(5, 12).Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False              'kopierer CO2 resultater
```

```
Sheets("inddata, niveau1").Select
```

```
Cells(23, 3).Select
```

```
ActiveCell.Value = "2"                'vælger forbehandling skruepresse
```

```
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
```

```
Sheets("Resultat Oversigt").Select
```

```
Cells(6, 4).Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False              'kopierer energiresultater
```

```
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
```

```
Sheets("Resultat Oversigt").Select
```

```
Cells(6, 12).Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False              'kopierer CO2 resultater
```

```
Sheets("Inddata, niveau1").Select
```

```
Cells(22, 3).Select
```

```
ActiveCell.Value = "2"                'vælger affaldstype Kolding
```

```
Cells(23, 3).Select
```

ActiveCell.Value = "1"           *'vælger forbehandling rullesigte*  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(8, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False       *'kopierer energiresultater*  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(8, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False       *'kopierer CO2 resultater*

Sheets("inddata, niveau1").Select  
Cells(23, 3).Select  
ActiveCell.Value = "2"           *'vælger forbehandling skruepresse*  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(9, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False       *'kopierer energiresultater*  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(9, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False       *'kopierer CO2 resultater*

Sheets("Inddata, niveau1").Select  
Cells(22, 3).Select           *'vælger affaldstype Vejle*

ActiveCell.Value = "3"  
Cells(23, 3).Select           *'vælger forbehandling rullesigte*  
ActiveCell.Value = "1"  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(11, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False       *'kopierer energiresultater*  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(11, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False       *'kopierer CO2 resultater*

Sheets("inddata, niveau1").Select  
Cells(23, 3).Select  
ActiveCell.Value = "2"           *'vælger forbehandling skruepresse*  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(12, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(12, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=

False, Transpose:=False     *'kopierer CO2 resultater*

Sheets("Inddata, niveau1").Select  
Cells(22, 3).Select             *'vælger affaldstype Ålborg*

ActiveCell.Value = "4"  
Cells(23, 3).Select  
ActiveCell.Value = "1"             *'vælger forbehandling rullesigte*  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(14, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False     *'kopierer energi resultater*  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(14, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False     *'kopierer CO2 resultater*

Sheets("inddata, niveau1").Select  
Cells(23, 3).Select  
ActiveCell.Value = "2"             *'vælger forbehandling skruepresse*  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(15, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False     *'kopierer energi resultater*  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(15, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False     *'kopierer CO2 resultater*

Sheets("Inddata, niveau1").Select  
Cells(22, 3).Select  
ActiveCell.Value = "5"             *'vælger affaldstype Grindsted*  
Cells(23, 3).Select  
ActiveCell.Value = "5"             *'vælger forbehandling ingen*  
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(17, 4).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False     *'kopiere energi resultater*  
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy  
Sheets("Resultat Oversigt").Select  
Cells(17, 12).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=  
False, Transpose:=False     *'kopierer CO2 resultater*

End If

*'FORBRÆNDINGSSCENARIER MED 4 TYPER AFFALD*

Sheets("inddata, niveau1").Select  
Cells(6, 5).Select  
ActiveCell.Copy             *'kopierer mængde affald til forbrænding*



```
Cells(7, 5).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValue, Operation:=xlAdd, SkipBlanks:=False _
, Transpose:=False
Cells(6, 5).Value = "0"
```

```
Cells(22, 3).Select
ActiveCell.Value = "1" 'vælger affaldstype Hovedstadsområdet
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(7, 4).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(7, 12).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
```

```
Sheets("inddata, niveau1").Select
Cells(22, 3).Select
ActiveCell.Value = "2" 'vælger affaldstype Kolding
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(10, 4).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(10, 12).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
```

```
Sheets("inddata, niveau1").Select
Cells(22, 3).Select
ActiveCell.Value = "3" 'vælger affaldstype Vejle
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(13, 4).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(13, 12).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
```

```
Sheets("inddata, niveau1").Select
Cells(22, 3).Select
ActiveCell.Value = "4" 'vælger affaldstype Ålborg
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(16, 4).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
```

```
Cells(16, 12).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
```

```
Sheets("inndata, niveau1").Select
Cells(22, 3).Select
ActiveCell.Value = "5" 'vælger affaldstype Grindsted
Sheets("Energistrømme").Range("c27 : i27").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(18, 4).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("co2-strømme").Range("c26:i26").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Cells(18, 12).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
```

```
Sheets("inndata, niveau1").Select
Cells(7, 5).Copy
Cells(6, 5).Select
ActiveSheet.Paste
Cells(7, 5).Value = "0"
```

*'Kopier ind antagelser for resultaterne*

```
Sheets("massestrømme").Select
Range("f5: g12").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Range("b22: c29").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=False
```

```
Application.CutCopyMode = False
Sheets("massestrømme").Select
Range("h5: h12").Copy
Sheets("Resultat Oversigt").Select
Range("e22: e29 ").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
```

```
Application.ScreenUpdating = True 'tænder skærm
End Sub
```