



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet  
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi  
Institutt for matematiske realfag og teknologi

2014

ISSN: 1503-9196

IMT Rapport 55

# Dokumentasjon av biogass- anlegget på Tomb VGS

Forfattere: Kristian Fjørtoft, John Morken og Magnus Gjetmundsen



Fjørtoft, K., Morken, J. Gjetmundsen, M. 2014. **Dokumentasjon av biogassanlegget ved Tomb VGS** - IMT Rapport 55. 42 s.

Ås/Oslo, desember 2014

ISSN: 1503-9196

RETTIGHETSHAVER

© Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU)  
Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

REDAKSJON

Leif Daniel Houck

KVALITETSSIKRET AV

Seksjon for Bygg og miljø, IMT, NMBU

OPPDRAGSGIVER(E)/BIDRAGSYTER(E)

Landbruksdirektoratet

KONTAKTPERSON(ER) HOS OPPDRAGSGIVER/BIDRAGSYTER

Nanna Bergan

FORSIDEBILDE

Foto: John Morken, NMBU

NØKKEWORD

Storfegjødsel, biogass, energiproduksjon, matavfall

KEY WORDS

Cattle manure, biogas, energy production, food waste

Kristian Fjørtoft ([krfj@hials.no](mailto:krfj@hials.no)), John Morken og Magnus Gjetmundsen.  
Institutt for matematiske realfag og teknologi, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet,  
Postboks 5003, NO-1432 Ås.

## Innhald

2 Innleiing .....	9
2.1 Litt teori om gardsbiogass .....	9
2.1.1 Husdyrgjødsel som biogasssubstrat.....	9
2.1.2 Energiutbyttet frå ulike substrat. ....	10
2.1.3 Hydraulisk opphaldstid og organisk belastning.....	10
3 Metode .....	12
3.1 Litt om anlegget på Tomb .....	12
3.2 Instrumentering og logging .....	14
4 Resultat og diskusjon.....	14
4.1 Energiproduksjon .....	14
4.2 Energiforbruk.....	15
4.3 Dei 21 testperiodane .....	16
4.4 Tilførsel av storfegjødsel .....	17
4.5 Tilførsel av matavfall .....	17
4.6 Substrata sine bidrag til biogassproduksjonen .....	18
4.6.1 Biogass frå storfegjødsel.....	18
4.6.2 Biogass frå matavfallet .....	18
4.6.3 Energiproduksjon vs matavfall .....	19
4.7 Karakterisering av dei ulike substrata. ....	20
4.7.1 pH .....	20
4.7.2 Tørrstoff og organisk tørrstoff i storfegjødsel .....	21
4.7.3 Tørrstoff og organisk tørrstoff i matavfallet.....	21
4.7.4 Tørrstoff og organisk tørrstoff i rotneresten.....	22
4.7.5 Omsetjing av organisk tørrstoff i reaktorane. ....	23
4.1 Inhibering i reaktoren.....	23
4.1.1 Ammonium-N .....	23
4.1.2 pH .....	24
4.1.3 Flyktige feittsyrer.....	24
4.2 Hydraulisk opphaldstid.....	25
4.3 Organisk belastning (OLR) .....	25
4.4 Energiproduksjon og organisk belastning .....	27
5 Energifordeling .....	28
5.1 Netto energi levert .....	28

5.2 Energiproduksjonen på Tomb over eit år.....	32
5.2.1 Elektrisk forbruk .....	32
5.2.2 Oppvarming av nytt substrat.....	32
6 Laboratorieforsøk med fire reaktorar .....	34
6.1 Forsøksreaktorane.....	34
6.2 Resultat.....	35
7 Diskusjon .....	37
8 Konklusjon .....	39
Referansar .....	40
Vedlegg:.....	40

## Forord

Det er få gardsbiogassanlegg i Noreg, truleg mindre enn fem som er i drift. Dette skuldast hovudsakeleg at vi ikkje har dei ramevilkåra gardsbiogass har i mange andre land. Byggekostnadane vil også vere relativt høge for små anlegg, samanlikna med større anlegg. Landbruks- og matdepartementet sette i 2009 eit mål om at 30 % av all husdyrgjødsel skulle behandlas i biogassanlegg. Årsaken var hovudsakeleg at biogas var ein metode til å redusere drivhusgassutslepp frå landbruket. Dersom ein skal nå målet treng vi anlegg som kan byggjast med lave kostnader. Firmaet Biowaz AS tok mål av seg til å oppfylle dette målet.

For å få til ei vellukka satsing på biogass vil det også vere viktig å dekke kompetansebehovet. Tomb VGS, som utdannar ungdom innan naturbruk og landbruk, såg dette som ein viktig del av utdanninga, og gjekk til innkjøp av anlegg frå Biowaz AS. Dette var eit prototype-anlegg, og bygge-perioden tok difor lenger tid enn det som var planlagt. Innan anlegget var i vanleg drift gjekk Biowaz AS konkurs, men firmaet Greengas AS gjorde ein del nødvendige endringar på anlegget, slik at det fungerte betre reint teknisk, og gjorde det mogleg å gjere dokumentasjonen.

Innovasjon Norge har program for delfinansiering av anlegg til fornybar energi. Når biogass-anlegg vert bygde, ynskjer dei at anlegga vert dokumenterte. Innovasjon Norge har også finansiert noko av måleutstyret, samt vore med på å finansierte ein del av ombyggingane som Greengas gjorde.

Dette prosjektet har vore finansierte av klima-programmet til Landbruksdirektoratet (tidlegare Statens Landbruksforvaltning).

Både Innovasjon Norge, ved Øyvind Halvorsen, og Landbruksdirektoratet, ved Nanna Bergan, skal ha ein stor takk. Utan deira støtte ikkje hadde vore mogleg å gjennomføre dette prosjektet.

Vi vil også rette ei stor takk til Tomb VGS og Knut Huseby for at dei har stilt biogassanlegget til disposisjon for oss, og for den jobben dei har gjort med å ta ut prøver, notere driftsdata, og generelt følgje opp prosjektet.

Ås, 8. desember 2014

John Morken, IMT/NMBU

## Samandrag

Fjørtoft, K., Morken, J. Gjetmundsen, M. 2014. **Dokumentasjon av biogassanlegget ved Tomb VGS** - IMT Rapport 55. 42 s.

Det vart i løpet av 2012 og 2013 gjort eit dokumentasjonsarbeid ved biogassanlegget på Tomb VGS i Østfold. Hovudformålet med arbeidet var å få meir kunnskap om gardsbiogassanlegg. Det vart i arbeidet sett på energibalanse, omsetning av organisk materiale, fare for inhibitering, med meir. Ei anna målsetjing med arbeidet var å sjå på moglegheitene for å auke biogassproduksjonen, og dermed styrkje økonomien til gardsbiogassanlegget. Det vart på anlegget på Tomb nytta matavfall som tilleggssubstrat. Parallelt med dokumentasjonsarbeidet vart det difor gjort eit reaktorforsøk med til dels store mengder matavfall. Erfaringar frå dette arbeidet har vorte nytta i den vidare drifta av biogassanlegget.

Energiproduksjonen ved biogassanlegget er betydelig. På eit år vart det produsert 656 185 kWh i form av varmt vatn (skorsteinstep ikkje medrekna). Dette motsvarar om lag 110 000 m<sup>3</sup> biogass. Av denne energien gjekk 47,7 prosent med til å dekke opp for internt termisk forbruk ved anlegget. Om lag halvparten av denne energien gjekk med til å dekke opp for oppvarming av nytt substrat, medan den andre halvparten gjekk til varmetap frå reaktorar og rørleidningar. Netto energiproduksjon, det som kunne nyttast utanfor anlegget, var såleis på berre vel 50 prosent. Dette er noko lågt.

Energimengda som går til å dekke tap frå overflater på anlegget, kan reduserast ved å isolere anlegget betre. Færre og større reaktorar vil også bidra positivt. Ved anlegget på Tomb er det mange små varmekretsar, som til saman brukar relativt mykje energi. Når det gjeld energi til oppvarming av nytt substrat, ville det vere ein stor fordel å ha varmevekslar i fortanken, slik at ein kan nyttegjere seg av varmeenergien i det utrotna substratet.

Den enklaste måten å redusere det prosentvise energitapet er ved å auke biogassproduksjonen. Dette vart også gjort under dokumentasjonsperioden. Energibehovet for oppvarming av ei volumeining matavfall er om lag det same som for ei volumeining husdyrgjødsel. Biogasspotensialet i matavfallet vil derimot ofte vere over 10 gongar av det ein får ut av husdyrgjødsel. Frå laboratorieforsøket fann ein at storfegjødsel gav eit energiutbytte på 2,3 kWh per kg organisk tørrstoff (VS), medan matavfallet gav heile 6,2 kWh per kg VS. Når ein i tillegg veit at innhaldet av VS i matavfall er heile fire gongar så høgt som i storfegjødsel, ser ein at matavfall er svært velegna som tilleggssubstrat i gardsbaserte biogassanlegg. Laboratorieforsøka viste at ei auke i tilført mengde matavfall frå 14,6 prosent til 32,2 prosent, gav ei auke i metanproduksjonen på heile 110 prosent.

Bruk av for mykje matavfall kan på den andre sida føre til inhibitering og kollaps i biogassproduksjonen. I andre del av laboratorieforsøket, der det vart brukt store mengder matavfall, hende dette med fleire av reaktorene. I dokumentasjonsarbeidet på Tomb vart det ikkje avdekket slike problem for dei mengdene med matavfall som der vart brukt. Dette var som forventa.

Gjennom dokumentasjonsarbeidet på Tomb lærte vi svært mykje, mellom anna kor viktig det er å optimalisere biogassproduksjonen ved anlegget. At Noreg har relativt låg årsmiddeltemperatur viste igjen på energitapet frå overflatene. Ein bør såleis ta ekstra omsyn til dette ved bygging av nye anlegg. For europeiske anlegg, der ein nyttar storparten av biogassen til produksjon av elektrisk kraft,

har ein ofte overskot på termisk energi. Store reaktorar har dessutan mindre overflate per volumeining reaktor og er såleis mindre sårbare. Gardsbiogass er likevel eit fornuftig konsept då ein har svært lite transport av substrat og næringsstoffa i rotneresten kan nyttast lokalt.

## Abstract

Fjørtoft, K., Morken, J. Gjetmundsen, M. 2014. **Dokumentasjon av biogassanlegget ved Tomb VGS.** [Documentation of the biogas plant at Tomb high school] - IMT Rapport 55. pp 42.

During 2012 and 2013 a documentation work was performed at Tomb VGS in Østfold, Norway. The objective of this work was to provide more knowledge about farm scaled biogas plants, and research areas such as energy balance, conversion of organic matter, potential inhibition. Another objective of the work was to investigate the potential of increasing the biogas production, and thereby strengthen the economy at the plant. A laboratory reactor experiment, with high loads of food waste, was therefore performed parallel with the documentation work. Experiences from this work were utilized in the further running of the full scale biogas plant.

The energy production at the biogas was 656 185 kWh per year for the investigated period in form of hot water (chimney losses not included). This equals about 110 000 m<sup>3</sup> biogas. Of this energy 47.7 percent was consumed by heating of new substrates and to cover for heat losses from reactors and pipes, approximately half for each of the two. Net energy available was thus only about 52 percent of the total energy produced. This is low.

The energy demanded to cover losses from the surfaces of the plant may be reduced by improving the insulation of the plant. Fewer and larger reactors will also contribute positively. At the Tomb plant there are several smaller heating circuits, which in total consume relatively much energy. A heat exchanger in the pre storage tank would be a great improvement. Some of the heat energy in the digested substrate might then be utilised to heat new substrates.

The easiest way to reduce the fraction of heat used to cover losses is to increase the biogas production. This was also done during the documentation period. The energy required to heat a volume unit of food waste is approximately the same as for dairy cow slurry. The biogas potential, on the other hand, is often more than ten times higher in food waste than in dairy cow slurry. The laboratory experiment demonstrated an energy production of 6.2 kWh per kg dry matter (VS) from the food waste, while the dairy cow slurry only gave 2.3 kWh per kg VS. The VS content is also four times higher in the food waste than in the slurry. This illustrates the importance of food waste as co substrate for farm scaled biogas plants. The laboratory experiment showed that an increase in the added food waste from 14.6 percent to 32.2 percent, gave a total increase in the methane production of 110 percent.

Too much food waste might on the other hand lead to inhibition and collapse in the biogas process. In the second part of the laboratory experiment more food waste was added, and several of the reactors collapsed. During the documentation of Tomb, no signs of inhibition were uncovered. This was as expected for the amounts of food waste that were used.

We learnt several things from the documentation work at Tomb. For example how important it is to optimise the biogas production. Norway's relatively low annual mean temperature was demonstrated in the energy demanded to cover losses from surfaces at the plant. This should also be taken into consideration when new plants are built. For European plants, where the biogas is



converted to electricity, there are usually substantial amounts of excess heat available. A larger reactor does not have as much surface area per volume unit digester, compared to smaller reactors, and is therefore more robust. Farm scaled biogas is after all a very good concept, as it requires very little transport of the substrates and the nutrients in the digestate can be utilised locally.

## 1 Innleiing

Biogassanlegget ved Tomb VGS, Råde i Østfold, vart bygd av firmaet Biowaz AS. Anlegget vart opna hausten 2010. Formålet med anlegget var å redusere fyringsutgifter ved undervisningsbygg og internat ved å utnytte storfe gjødsel til produksjon av biogass. Det var ein del tekniske utfordringar med anlegget. Firmaet GreenGas AS gjorde difor ein del endringar med det hausten 2012. I tillegg har gassbrennaren vorte byta ut med ein med større type. På grunn av problema med anlegget, samt noko ustabil drift i periodar, har dokumentasjonsarbeidet strekt ut i tid, og omfattar såleis både 2012 og 2013.

Noko av formålet med dokumentasjonsarbeidet var å sjå på mogelegheitene for å auke biogassproduksjonen ved anlegget. Matavfall, som vert nytta som tilleggssubstrat på anlegget, har svært høgt energiinnhald i forhold til storfe gjødsel, ofte over ti gongar så høgt. Bruk av meir matavfall kan såleis auke biogassproduksjonen betrakteleg. For store mengder matavfall kan på den sida føre til ustabilitet i prosessen, og i verste fall total stopp i biogassproduksjonen. I samband med dokumentasjonsarbeidet vart det difor gjort eit forsøk med små reaktorar på biogasslaboratoriet. Her ynskte ein særleg å sjå på kor mykje matavfall ein kunne bruke, utan at ein fekk ustabilitet i prosessen. I dokumentasjonsarbeidet nytta ein seg av desse resultatane, og auka mengde matavfall tilført i løpet av 2012.

Eit anna formål med dokumentasjonsarbeidet var å finne ut kor mykje av energi som gjekk med til å drifte anlegget, og kor mykje av energien ein kunne gjere seg nytte av. Mange småskala biogassanlegg er bygde utan varmevekslar, og med lite bruk av isolerande materialar. Små reaktorar vil dess utan ha forholdsvis mykje overflate per volumeinings substrat enn kva tilfellet vil vere for ein større reaktor. Dette, sett i samband med at vi har eit relativt kjøleg klima, gjorde det svært interessant å finne ut av kor mykje av energien som gjekk med til å drifte anlegget.

### 1.1 Litt teori om gardsbiogass

Biogass er ein energirik gass, danna under anaerob omsetjing av organisk materiale. Gassen består hovudsakeleg av metan (45-70%) og karbondioksid (30-50%). Omdanninga går over fleire trinn, der ulike mikroorganismar deltek på dei ulike trinna. Dei fire trinna er: hydrolyse, syredanning, eddiksyredanning og til slutt metanogenesen.

#### 1.1.1 Husdyrgjødsel som biogasssubstrat

Storfe gjødsel er eit svært godt grunnsubstrat for ein biogassreaktor. I gjødsel er dei fleste av makro- og mikronæringsstoff som trengst i prosessen. Gjødsel har ei bufferevne som i stor grad vil redusere svingingar i pH. Storfe gjødsel, som ofte har eit tørrstoffinnhald på mellom 5 og 9 prosent, vil virke fortynnande på tilleggssubstrat med høgare tørrstoffinnhald og dermed stabilisere prosessen. På eit gardsbruk vil husdyrgjødsel vere tilgjengeleg i store kvanta til ein lav pris. Bioresten frå anlegget kan brukast som gjødsel på nærliggande areal. Denne vil vere meir tyntflytande enn den opprinnelege gjødsel så ho trengjer raskare ned i jorda. Bioresten vil dess utan lukte mindre, meir av næringsstoffa vil føreligge på mineralisk form og såleis verte tekne raskare opp av plantane, det meste av ugrasfrø har vorte inaktivert i biogassreaktoren og den omsetjelege delen av karbonet i gjødsel har vorte omdanna til fornybar energi før det vert sleppt til bake til atmosfæren. Tilførsel av tilleggssubstrat som til dømes matavfall også vil tilføre garden næringsstoff. Dette må sjåast på som eit svært viktig

moment, både for bonden og for samfunnet. På den andre sida er biogasspotensialet i storfe gjødsel relativt lite per volumeining gjødsel, og bruk av energirike tilleggssubstrat vil vere viktig for å få opp biogassproduksjonen per volumeining reaktor.

Ved bruk av tilleggssubstrat, som til dømes matavfall, fiskeensilasje, energivekstrar og glyserol, vil ein oppnå langt høgare gassproduksjon per volum reaktor enn kva ein får med husdyrgjødsel som einaste substrat. Dette fordi tilleggssubstrata har mykje høgare innhald av organisk tørrstoff (VS) enn blautgjødsel, samt at dei ofte vil vere meir lett omsetjeleg. Det organiske materialet ein finn i blautgjødsla har passert fordøyingsystemet til dyret, der det mest lett omsetjelege har vorte omdanna og teke opp av dyret. Ein høgare produksjon av biogass per volumeining reaktor vil ha svært mykje å seie for økonomien til anleggseigaren. Etter som energien som krævast for å produsere biogass i stor grad er relatert til volum substrat og reaktor, vil tilleggssubstrat også bidra positivt til energiballansen til anlegget.

På den andre sida vil bruk av for mykje matavfall føre til ustabilitet i reaktoren. Omdanninga av det organiske materialet i matavfallet til organiske syrer vil til dømes ta seg langt raskare opp enn kva tilfellet er for omdanninga av organiske syrer til metan. Dette kan føre til ei opphoping av organiske syrer i reaktoren, som igjen vil redusere aktiviteten til dei metandannande organismane og slik ein sjølvforsterkande prosess som til slutt fører til stans i metanproduksjonen. Høgt innhald av proteinrikt substrat kan på si side før til så høge ammoniakk-verdiar at prosessen stoppar opp. Langkjeda feittsyrer vil også hindre metandanninga.

### **1.1.2 Energiutbyttet frå ulike substrat.**

Energipotensialet til eit substrat vil i fyrste rekkje vere avhengig av innhaldet av organisk tørrstoff (Volatile Solids – VS). I tillegg vil type organisk tørrstoff virke inn på kor mykje energi ein får. Feitt, protein og karbohydrat har ulikt biogasspotensiale. For å få ut energien i form av biogass, er også nedbrytbarheita til substrata svært viktige. Til dømes vil karbohydrat i form av sukker verte raskt omdanna til biogass. Tungt nedbrytbare fraksjonar, som til dømes hemicellulose og lignin kan derimot passere i biogassreaktoren, utan at ein får noko særleg biogassutbytt. I tillegg til dei kjemiske og fysiske eigenskapane til substrata, vil til dømes opphaldstid og temperatur i reaktor, innblanding/omrøring, tilpassing av mikroflora, og balansering av dei ulike substrata virke inn på kor mykje biogassutbytte vi får.

### **1.1.3 Hydraulisk opphaldstid og organisk belastning**

Lang opphaldstid i biogassreaktoren vil oftast gje eit høgare biogassutbytte per eining substrat. For eigaren av biogassanlegget vil det derimot oftast vere av størst interesse å få ein høg total biogassproduksjon ved anlegget. For å få til dette vil ein gjerne tilføre relativt mykje substrat. Ein får då eit noko lågare biogassutbytte per eining substrat, men eit totalt mykje høgare biogassutbytte ved anlegget. Særleg vil tilførsel av energirike tilleggssubstrat, som til dømes matavfall, gje ein stor auke i den totale biogassproduksjonen

Men det er diverre nokre farar knytt til det å auke biogassproduksjonen for mykje. Når det gjeld det å regulere mengde substrat, er det oftast to parametar ein ser på: Organisk belastning (Organic Loading Rate - OLR) og hydraulisk opphaldstid (Hydraulic Retention Time – HRT). OLR måler vi ofte i

kg organisk tørrstoff per m<sup>3</sup> reaktorvolum og dag. Denne viser såleis kor mykje organisk tørrstoff ein tilfører reaktoren per volumeining per dag. Høg organisk belastning er viktig for å få mykje biogass, men for høg vil føre til opphoping av organiske syrer og surgang, eller «koking», som er ein tilstand der mengder av små gassbobler ikkje klarar å flyte opp, men vert fanga i substratet. Substratet vil difor ese ut over, og kan øydelegge reaktordukar osb.

Hydraulisk opphaldstid viser kor lenge i gjennomsnitt eit substrat er i reaktoren, målt i dagar. Denne parameteren finn ein ved å dele aktivt reaktorvolum (volumet av reaktoren som er fylt opp med masse) på volumet substrat som vert tilført per dag. Det er viktig å ha ei høveleg hydraulisk opphaldstid for å få tilfredsstillande stor biogassproduksjon. Ein uerfaren anleggseigar ynskjer gjerne å ha ei kort hydraulisk opphaldstid. Då det gjer at ein kan tilføre eit større volum substrat per volum reaktor og dag, og dermed større biogassproduksjon. For kort hydraulisk opphaldstid kan der i mot føre til «utvasking» av metanogene organismar, og biogassproduksjonen vil då etter kvart stoppe opp. Grunnen til denne «utvaskinga» er at dei metanogene organismane har ei viss delingstid. I substratet ein pumpar ut frå reaktoren vil det oftast vere like stor konsentrasjon av metanogene organismar som elles i reaktoren. Dersom den hydrauliske opphaldstida då er kortare enn faktisk delingstida, vil ein fjerne fleire metanogene enn det vert danna. Typisk hydraulisk opphaldstid for ein mesofil gardsbiogassreaktor er vel 20 til omlag 30 dagar. Ein har frå studiar sett teikn på at metanogene i reaktorar som har høge ammoniums-verdiar, dvs reaktorar der ein tilfører mykje proteinrikt materiale, som til dømes fiskeensilasje, har ei lengre delingstid, og difor treng ei lengre hydraulisk opphaldstid.

Tilfører ein biogassreaktoren berre ein type substrat, til dømes husdyrgjødsel, vil organisk belastning og hydraulisk opphaldstid vere motsett korrelert: Aukar ein den organiske belastninga ved å tilføre meir husdyrgjødsel, så går den hydrauliske opphaldstida ned. For å utnytte kapasiteten til dei metanogene i biogassreaktoren, utan at ein risikerer at dei vert vaska ut, kan ein då auke den organiske belastninga ved å tilføre energirike tilleggssubstrat. Desse har relativt høgt biogasspotensiale per volumeining, så ein får tilfredsstillande OLR, utan at HRT vert redusert til eit kritisk nivå.

I optimeringsarbeidet kan ein såleis fokusere meir på kor mykje tilleggssubstrat, her matavfall, ein tilset. Diverre er det også ulemper med å tilføre for store mengder matavfall. Som nemnt kan for høg organisk belastning føre til ustabilitet i reaktoren. For store mengder protein kan føre til nedsett aktivitet på grunn av ammonium/ammoniakk. I tillegg kan langkjeda feittsyrer, mangel på enkelte næringsstoff, for mykje av andre stoff, låg temperatur i reaktoren, for høg temperatur i reaktoren, for lite røring, for mykje røring, blindstraumar i reaktoren, etc redusere biogassutbyttet frå reaktoren.

## 2 Metode

Prosjektet *Dokumentasjon av biogassanlegget på Tomb VGS* omfatta to hovuddelar. Den fyrste delen gjekk på dokumentasjon av det fullskala anlegget på Tomb, med ulike laster av storfe gjødsel og tilleggssubstrat. Det vart i denne delen fokusert på dokumentasjon av biogassproduksjon og energiforbruk. Den andre delen av arbeidet var eit laboratorieforsøk med fire reaktorar. Formålet med dette arbeidet var å undersøke produksjonspotensialet for biogass ved ulike mengder matavfall i substratblandinga. Inokkulum, storfe gjødsel og matavfall vart i dette forsøket henta frå Tomb.

### 2.1 Litt om anlegget på Tomb

Biogassanlegget ved Tomb VGS, ligg på Tomb i Råde i Østfold (sjå kart) og vart bygd av firmaet Biowaz AS. Anlegget vart opna 26 oktober 2010 av Fylkesmann Anne Enger. Formålet med anlegget er å redusere fyringsutgifter til skule og internat ved å utnytte storfe gjødsel til produksjon av biogass.

Anlegget vart bygd av Biowaz i 2010. I 2012 vart det noko ombygd av Greengas. Anlegget (Figur 1) består av to reaktorar som vert køyrt parallelt. Samla reaktorvolum er 340 m<sup>3</sup> og effektivt reaktorvolum er på i overkant av 300 m<sup>3</sup>. Hovudsubstratet er blaut storfe gjødsel frå mjølkebesetninga samt gjødsel frå påsett og nokre kjøtfe. Påsett og kjøtfe har normalt noko høgare tørrstoffinnhald i gjødsel. I mjølkebesetninga er det montert mjølkerobot. Dette vil normalt føre til ei litt tynnare gjødsel, på grunn av bruk av meir vaskevatt. Før gjødsel vert pumpa inn i reaktorane, vert ho lagra i ein fortank. Denne har omrøring, noko som sikrar ein jamnare kvalitet. Det er også montert ei varmesløyfe i fortanken. Reaktortankane og fortanken er laga av isolerte plastelement som er nedgravne. På innsida er dei dekte av ein PVC-duk. Reaktorane har også PVC-duk over, med vasslås rundt kantane. Det er i etterkan også bygd «telt» i stål og PVC-duk over reaktorane. Dette mellom anna for å beskytte mot ytre påkjenningar som snø og vind.

Matavfall, som vert brukt som tilleggssubstrat, vert lagra i ein isolert tank med omrøring. Matavfallet vert levert ferdig hygienisert. Pumper, ventilar og datastyring er plassert i teknikk-kontainaren på anlegget. Her er også gassbrennaren plassert. Under dokumentasjonsarbeidet vart dataloggar og måleutstyr også plassert her.

Frå reaktorane vert det utrotna substratet pumpa over i sluttlagertanken. Dette er det tidlegare gjødsellageret på garden. Det er i etterkant bygd ein ekstra sluttlagertank i tilknytning til biogassanlegget.

Biogassen frå anlegget vert nytta til oppvarming av vatn. Frå teknikk-kontaineren går det varme vatnet til varmevekslarar i undervisningsbygget og elevinternatet. I tillegg vert varmt vatn brukt til oppvarming av reaktorane, forvarming av husdyrgjødsel i fortanken, oppvarming av vasslås på reaktorane samt oppvarming av pumperommet der pumpa for matavfall som skal inn til matavfallstank samt gjødsel som skal inn til fortank, er plassert.

Anlegget består av to reaktorer, kvar på 170m<sup>3</sup>, i tillegg til fortank på 130m<sup>3</sup>, matavfallstank på 50m<sup>3</sup> og ein kontainer med styring, pumpe og brennar. Pumpa i teknikk-konteinaren vert nytta til fleire formål:

1. uttapping frå reaktorane til sluttlager
2. pumping av ny husdyrgjødsel frå fortank til reaktorar
3. pumping av matavfall frå matavfallstank til reaktorar

Anlegget er eit såkalla semi-kontinuerleg anlegg der ein pumpar inn substrat fem gongar i døgeret. Før nytt substrat vart pumpa inn i reaktoren, vart tilsvarande volum pumpa ut frå reaktoren. Etter som det berre er ei røyrleidning mellom teknikk-kontainer og reaktor, går det substratet som ligg igjen i røyrleidninga direkte til sluttlager utan å gå innom reaktoren fyrst. Konsekvensane av dette er forsøkt redusert ved å pumpe husdyrgjødsel til slutt. Det er også vurdert å pumpe utrotna substrat mellom reaktorane, slik at det behandla substrat ligg igjen i leidningane.

Dokumenstasjonsarbeidet vart gjennomført i 2012 og 2013. Oppstart av arbeidet vart mykje utsett grunna at anlegget ikkje var i stabil drift. Det vart også i dokumentasjonsperioden gjennomført ein god del utbetningsarbeid. Mellom anna var det vanskeleg å samkøyre brennaren med gassproduksjonen i anlegget. Dette førde tidvis til tap av biogass.



Figur 1. oversiktsbilete av biogassanlegget på Tomb VGS. Kjelde: <http://kart.gulesider.no>

## 2.2 Instrumentering og logging

Dokumentasjonsarbeidet vart gjennomført på fleire måtar. Ein del målepunkt vart montert og logga direkte til PC. Andre verdiar vart noterte med ulikt mellomrom. Mengde storfe gjødsel inn i anlegget vart til dømes berekna ut frå gangtida av pumpe. Pumpe som pumpar inn substrata til reaktorane, er av typen rotasjonsstempelpumpe. Denne fungerte som ei doseringspumpe, der ein fann volumet ein pumpe inn ved å multiplisere pumpekapasitet per tidseining med gangtid. Mengde matavfall vart der i mot berekna på bakgrunn av notert fyllingsgrad i matavfallstank, korrigert opp mot tal lastebillast matavfall tilført anlegget i perioden. Ein prosent fyllingsgrad korresponderte med om lag 530 kg matavfall.

På røyra ut og inn frå gasskjelen var det montert ein energimålar. Målarstanden på denne vart notert ned med jamne mellomrom, og rekna om til dagleg energiproduksjon. Denne verdien er vidare kalla brutto energiproduksjon ved anlegget. Produksjonen av metan var der i mot noko høgare, då skorsteinstapet ikkje var inkludert.

I undervisningsbygg og internat var det montert termisk energimålar ved varmevekslarane. Målarstanden på desse vart notert ned med jamne mellomrom. Desse verdiane representerte netto energi frå anlegget. Differansen mellom energi ut frå fyrkjel og energi levert bygningane var termisk energi som gjekk med til å drifte anlegget, det vil seie varme opp nytt substrat og dekke opp for varmetap ved anlegget, samt energi som gjekk tapt i overføringsleidningane mellom fyrkjel og internat- og undervisningsbygg.

Biogassen vart også forsøkt analysert med ein gassanalysator. I oppstarten vart det forsøkt brukt ein stasjonær biogassmålar, av typen Ados Biogas 401, laga i Tyskland. Denne kunne måle gassane CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S og O<sub>2</sub>. På grunn av mykje fukt i gassen, let det seg ikkje gjere å bruke denne gassmålaren, og ein portable biogassmålar av typen GA 2000 vart brukt høvesvis. Denne viste eit metaninnhald på om lag 62 prosent.

Temperatur i tankane vart logga på styrings-PC på anlegget. Det var tidvis problem med å halde høg nok temperatur.

I delar av forsøksperioden vart det teke ut prøver for analyser. Dessverre gjekk mange av desse prøvene tapt då frysaen desse prøvene var lagra i, gjekk i stå pga overfløyning med gjødsel.

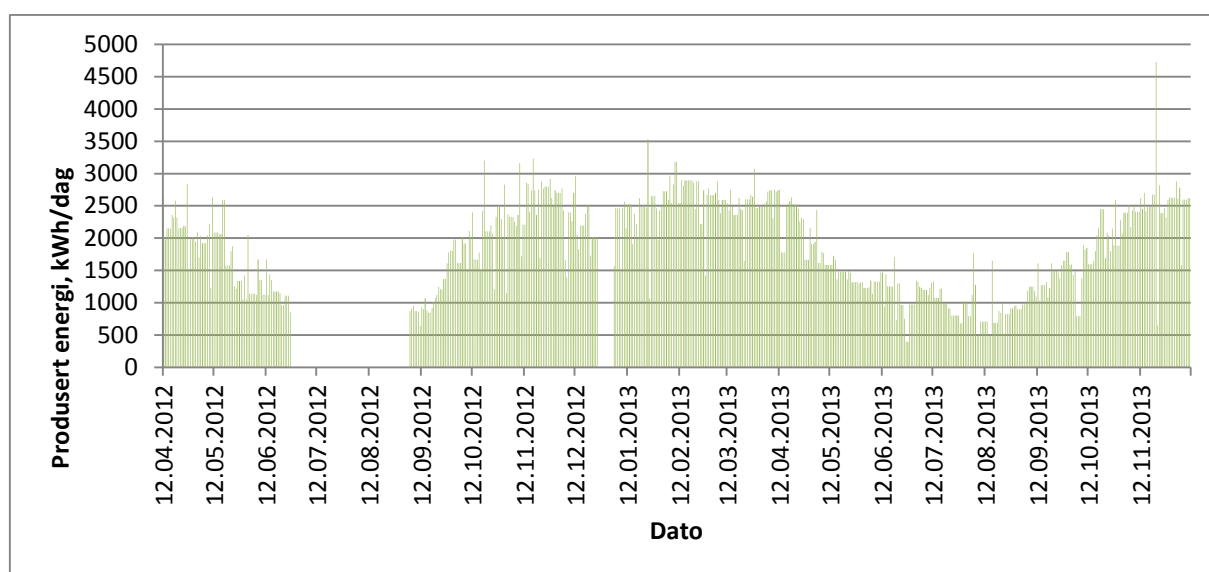
## 3 Resultat og diskusjon

### 3.1 Energiproduksjon

Biogassproduksjonen ved Tomb varierte mykje gjennom året. Om sommaren var energibehovet ved skulen lite, samstundes som mengda med tilgjengeleg husdyrgjødsel var svært låg. Om vinteren var derimot energibehovet stort, og ein hadde mykje substrat tilgjengeleg. Som ein ser av figuren under vart det produsert mykje biogass i vinterhalvåret. Teknisk svikt, feil i dimensjonering, feil på pumper osv forårsaka ein del svingingar i gassproduksjonen. Figur 2 viser den daglege biogassproduksjonen, målt i kWh per dag. Ein kubikkmeter biogass svarar til om lag 6 kWh, då ein kubikkmeter metan

svarar til om lag 10 kWh. Energitalp i brennar og tap av biogass frå reaktorar er ikkje tekne med i berekningane vidare. I diagrammet kan ein sjå at dagar med svært høg produksjon kan vere etterfylgd av dagar med låg produksjon, eller motsett. Dette skuldast at avlesingane vart gjort manuelt, til ulike tider på dagen. Der det var fleire dagar mellom avlesingane, til dømes i enkelte helgar, vart gjennomsnittleg gassproduksjon rekna ut.

Gassproduksjonen for dei målte periodane var i gjennomsnitt 1856,9 kWh per dag. Gjennomsnitt for periodane med mykje gassproduksjon låg der i mot på over 2500 kWh, som det gjorde i november og desember i 2013.



Figur 2. Brutto energiproduksjon per dag, målt i kWh.

### 3.2 Energiforbruk

På eit biogassanlegg er det ikkje berre energiproduksjonen som er viktig. Kor mykje energi som vert brukt er også svært viktig. Energiforbruket kan grovt delast i to: elektrisk og termisk energiforbruk. Det elektriske forbruket skuldast hovudsakeleg pumping og røring på anlegget. Det elektriske energiforbruket vart målt i perioden 9/11-12 til 11/12-13. Det varierte då frå i overkant av 50 kWh per dag til i overkant av 100 kWh per dag, med eit snitt på 62,3 kWh/dag. Ofte vil det vere store mogelegheiter for å redusere det elektriske energiforbruket. Dette kan gjerast ved å redusere røringa til eit minimum, bruke energieffektive røremetodar, samt legge opp substrat-straumane på ein mest mogeleg effektiv måte.

Det termiske energiforbruket til anlegget kan også delast i to: Energi til oppvarming av nytt substrat og energi til dekking av energitalp frå reaktorane. Det termiske energibehovet vil såleis variere både etter kor mykje substrat ein tilfører og kva temperatur omgjevnadane har. Det var ikkje montert varmevekslar for substrata ved anlegget. Dette førde til at alt nytt substrat måtte varmast opp med energi frå biogassen.



Det var ikkje mogeleg å måle energiforbruket ved anlegget direkte. Energiforbruket vart difor rekna ut ved å trekkje energien som vart levert på internat og undervisningsbygg frå den totale energiproduksjonen. Energi som gjekk tapt i overføringa mellom fyrkjel, internat og undervisningsbygg er såleis teke med i energiforbruket til anlegget. Det vart her hovudsakeleg nytta 63 mm leidning, med noko 50 mm leidning frå krysset mellom bygningane. Lengde tur/retur var om lag 900 m. Tur og retur-leidningane låg inne i kvar sine grovare røyr, fylde med isolerande skum.

<http://www.sgp.no/Fjernvarmerør/fjernvarmeror.asp?meny=1,6,17&act=read&RecNo=138>

### 3.3 Dei 21 testperiodane

For lettare å kunne få innsikt i svingingane i energiproduksjon og energiforbruk ved anlegget, vart måleperioden delt opp i 21 ulike delperiodar. Desse vart plukka ut på bakgrunn av fleire kriterier. Mellom anna skulle tilført mengde av dei to substrata vere likt for heile perioden. Måleresultata i perioden måtte også vere komplette. Vidare i rapporten vert det fokusert på desse 21 periodane. Periodar med store avvik er ikkje tekne med. Døme på slike avvik kunne vere problem med brennar, trykksensor, lekkasje og problem med styringa av anlegget. Anlegget ved Tomb hadde enno rom for betra styring då målingane tok til. Mellom anna var det problem med samkøyinga mellom gassproduksjon og sirkulasjonspumpe. Dette førte til at brennaren stoppa, sjølv om det var mykje gass tilgjengeleg. Dette førte igjen til at gass til tider bobla ut gjennom overtrykksannordninga.

Tabell 1. Brutto energiproduksjon, tilført mengde storfe gjødsel og tilført mengde matavfall i dei 21 periodane.

Periode	kWh/dag	Gjødsel, m3/dag	Matavfall, m3/dag
1	1999	11,70	1,61
2	2267	11,18	1,69
3	2589	11,05	1,95
4	2723	11,05	2,06
5	2254	11,05	1,73
6	2276	11,12	1,93
7	2386	11,29	2,01
8	2856	11,62	2,10
9	2571	11,62	2,02
10	2625	11,62	2,09
11	1541	11,96	0,89
12	1285	12,35	0,57
13	1215	12,35	0,39
14	851	9,00	0,00
15	898	8,55	0,54
16	1249	8,28	0,67
17	1475	12,88	0,79
18	2115	12,32	1,73
19	2330	12,32	1,67
20	2543	11,90	2,09
21	2570	10,71	2,37

I Tabell 1 er brutto energiproduksjon, målt i kWh per dag, samt tilført mengde substrat for dei 21 periodane vist. Tilført mengde storfe gjødsel var relativt stabil i innefôringsperioden (periode 1 til 13 og 17 til 21), medan mengda matavfall som vart tilført, og dermed energiproduksjonen, endra seg mykje meir.

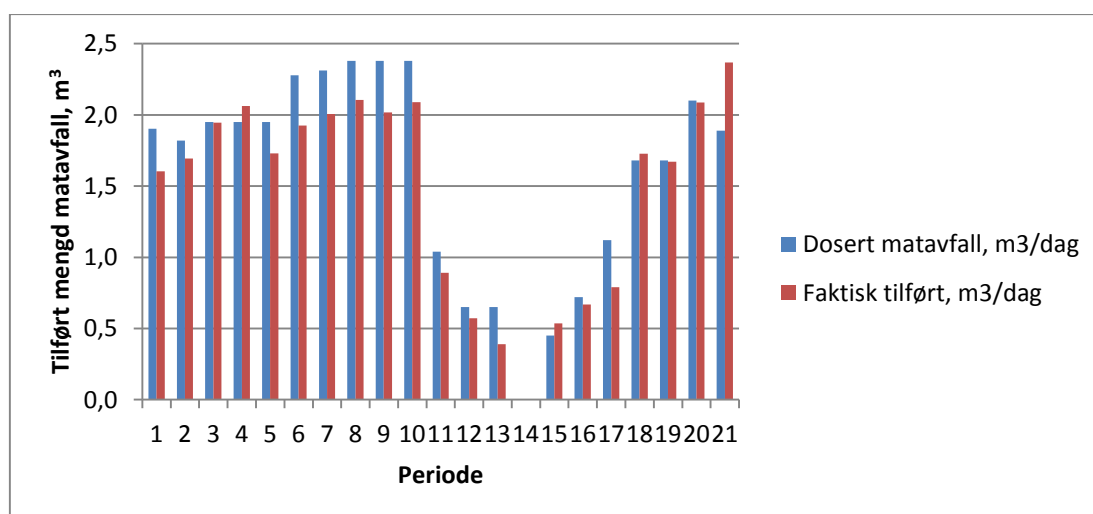
### 3.4 Tilførsel av storfe gjødsel

Mengde tilført storfe gjødsel var relativt stabil for innefôringsperioden, men varierte frå 10,71 m<sup>3</sup> til 12,88 m<sup>3</sup> per dag. I periodane 14, 15 og 16 var ein stor del av buskape ute på beite. Tilført mengde storfe gjødsel i desse periodane var difor mellom 8,28 og 9 m<sup>3</sup> per dag.

### 3.5 Tilførsel av matavfall

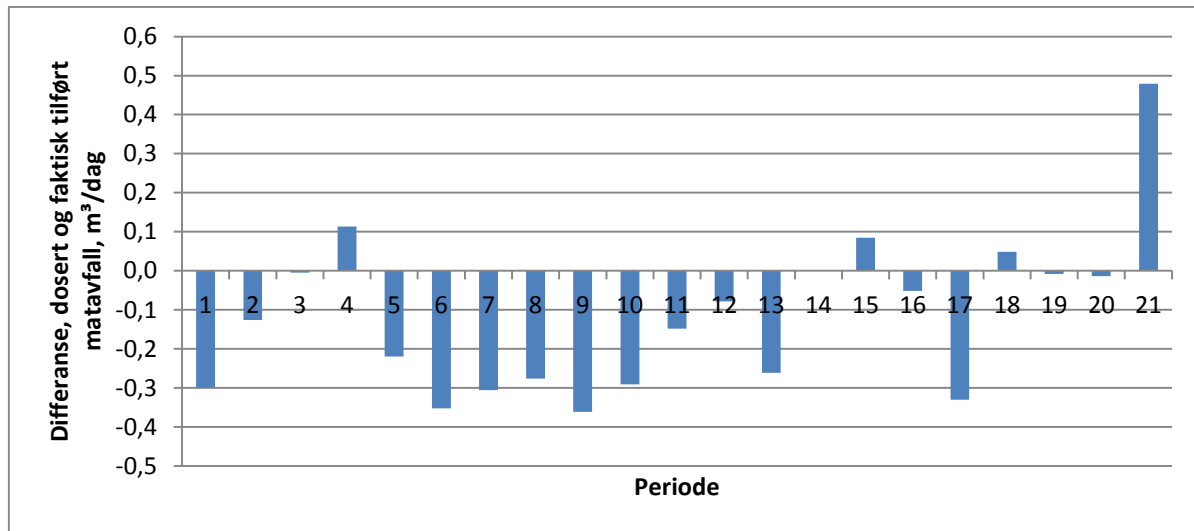
Tilført mengde matavfall varierte i innefôringsperioden mellom 0,65 og 2,38 m<sup>3</sup> per dag (Figur 3). Noko av grunnen for denne relativt store variasjonen i mengda matavfall som vart tilført, er at denne vart brukt til å regulere mengde biogass som vart produsert ved anlegget. Til dømes vart mengda matavfall redusert i varmeperiodar om våren, når energibehovet var lite. Ved anlegget var det ingen mogelegheiter for å lagre energi, som til dømes biogass eller varmt vatn. Det vart difor diskutert om ein burde lage eit doseringssystem der mengde tilført matavfall vart tilført justert etter forventa energibehov. Ein kunne til dømes nytte forventa temperatur frå langtidsvarsel, forventa tal studentar på internat osv som bakgrunn for ein slik modell. Dette kan vere aktuelt å arbeide vidare med i seinare prosjekt.

Dei logga nivå i matavfallstanken vart brukte til å berekne kor mykje matavfall som faktisk gjekk med. Det vart då funne at ein for dei fleste månadane tilførte mindre matavfall enn planlagt. I periode 17 skuldast nok av dette at matavfallstanken gjekk tom mot slutten av perioden. Den viktigaste årsaka var truleg at doseringssystemet ikkje fungerte godt nok. Matavfall kan vere vanskeleg å dosere jamt då dei tyngste fraksjonane delvis vil sedimentere. Slitne hjul på dreiestempelpumpa kan også føre til låg tilførsel.



Figur 3. Dosert og faktisk tilført mengde matavfall, målt i m<sup>3</sup> per dag, for dei 21 periodane.

Figur 4 viser differansen mellom dosert mengde matavfall og faktisk mengde matavfall som vart tilført.



Figur 4. : Differanse mellom dosert og faktisk tilført mengde matavfall, målt i m<sup>3</sup> per dag, for dei 21 periodane.

For dei vidare berekningane er faktisk mengde tilført matavfall nytta.

### 3.6 Substrata sine bidrag til biogassproduksjonen

#### 3.6.1 Biogass frå storfe gjødsel

Generelt veit ein at matavfall bidreg mykje meir til biogass-produksjonen, per volumeining substrat, enn kva tilfellet er for storfe gjødsel. For å finne ut kor mykje matavfallet bidrog med på Tomb, vart periode 14 nytta som referanseperiode. I denne perioden vart det berre brukt storfe gjødsel som substrat. Det vart dagleg tilført 9 m<sup>3</sup> storfe gjødsel, noko som i snitt gav ein energiproduksjon på 851 kWh per dag. Dette svarar til 94,5 kWh per m<sup>3</sup> gjødsel.

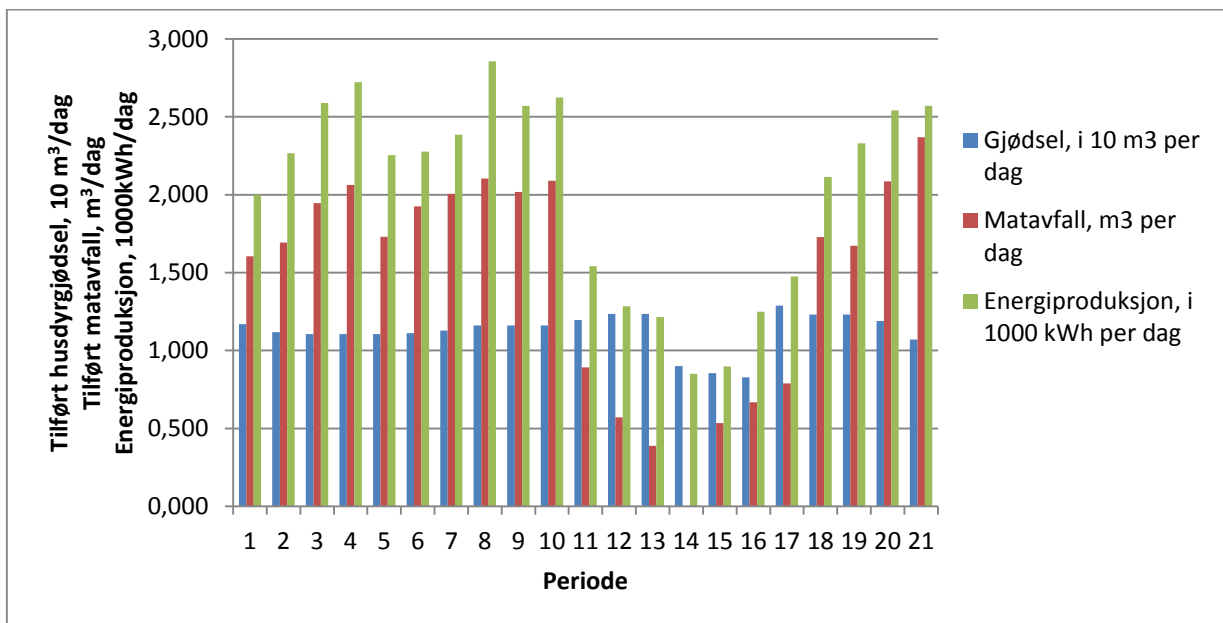
#### 3.6.2 Biogass frå matavfallet

Ved å trekkje 94,5 kWh per m<sup>3</sup> gjødsel som vart tilført i dei andre periodane, kunne ein rekne ut kor mykje matavfall bidrog med.

Det er like vel nokre innvendingar mot å gjere det på denne måten. I periode 14 var den hydrauliske og organiske belastninga relativt låg. Innhaldet av organisk tørrstoff i gjødsel vil variere gjennom året. Det same vil kor lett det organiske tørrstoffet vert nedbrote. Ved låg organisk belastning og lang hydraulisk opphaldstid vil ein ofte få ut meir biogass per volumeining gjødsel. Ein risikerer såleis å få ei viss underestimering av biogassutbyttet frå matavfall. Vi vel like vel å bruke desse verdiane i dei vidare utrekningane.

Ser ein på inneføringsperiodane, det vil seie frå periode 1 til og med periode 10, samt periode 16 til og med periode 21, med unntak av periode 17, får ein i snitt eit biogassutbytte på 696 kWh per m<sup>3</sup> matavfall, med eit standardavvik på 81,54. Ein får såleis ut meir enn sju gongar så mykje energi per volumeinng matavfall, samanlikna med husdyrgjødsel. Truleg var biogassutbyttet frå matavfall enda større, då det var i periodar med mykje matavfall det bobla ut mest gass. Denne gassproduksjonen er ikkje registrert.

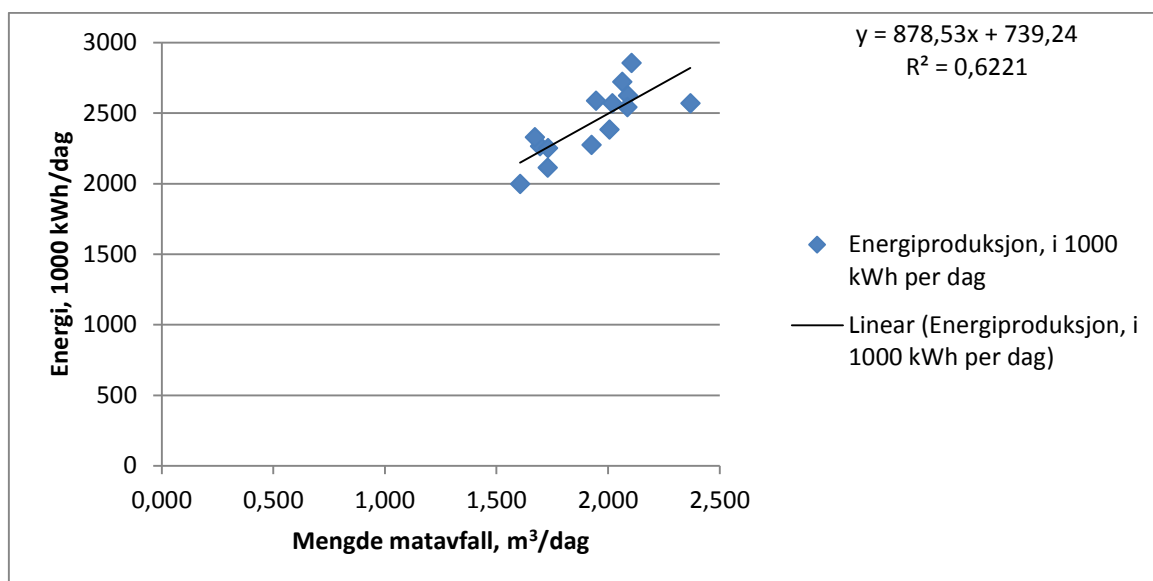
Målingane ved Tomb viste ein sterk samanheng mellom tilført mengde matavfall og gassproduksjon. Dette er gjort enno tydelegare i Figur 5. Der er energiproduksjonen oppgjeven i 1000 kWh per dag, gjødsel i 10 m<sup>3</sup> per dag og matavfall i m<sup>3</sup> per dag. Mengda storfe gjødsel som vart tilført i inneføringsperioden var relativt konstant, medan tilført mengde matavfall varierte mykje meir. Ein ser her korleis biogassproduksjonen responderer på mengde matavfall tilført.



Figur 5. Energiproduksjon og tilført mengde matavfall i dei 21 periodane.

### 3.6.3 Energiproduksjon vs matavfall

Ser vi nærare på inneføringsperiodane, som var periodane 1 til 10 og 18 til 21, var samsvarte biogassproduksjonen sterkt med tilførselen av matavfall (Figur 6). Gjennomsnittleg dagleg tilførsel av storfe gjødsel per periode var 11,47 m<sup>3</sup> per dag (desse tala er ikkje vekta mot kor mange dagar det var i perioden). Ut frå trendlinja bidrog dette til 739,24 kWh per dag, eller 64,5 kWh per m<sup>3</sup> gjødsel. Dette er noko lågare enn det vi fann med bakgrunn i periode 14, der energiproduksjonen var 94,5 kWh per m<sup>3</sup> storfe gjødsel. Noko av denne skilnaden kan forklarast med at opphaldstida i periode 14 var lengre og dermed omdanninga av det organiske tørrstoffet større.



Figur 6. Energiproduksjon som funksjon av mengde matavfall.

### 3.7 Egenskaper av dei ulike substrata.

Det vart teke ut og analysert prøver frå to delar av forsøksperioden. Den eine var på våren i 2012, medan den andre var i januar 2013. Prøvene vart analysert av Eurofins.

#### 3.7.1 pH

Tabell 2 viser pH verdier i prøver teke av gjødsel, matavfall og i dei to reaktorane (R1 og R2). pH i gjødsel var relativt stabil, og låg ikring 8. Matavfallet var surt, med pH på i snitt 4. Dette skuldast truleg frigjevne syrer frå substratet. Ved denne pH-verdien er matavfallet lagringsstabil. Ved låg pH vil det meste av det minimaliserte nitrogenet i rotneresten vere i form av ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Ved høgare pH vil ein større del av nitrogenet finnast som ammoniakk ( $\text{NH}_3$ ), då ammonium og ammoniakk ligg i ei likevekt med kvarandre som vert styrt av pH og temperatur. Dess høgare temperatur og høgare pH, dess større del i form av ammoniakk. Høge verdier av ammoniakk vil hemme danninga av metan.

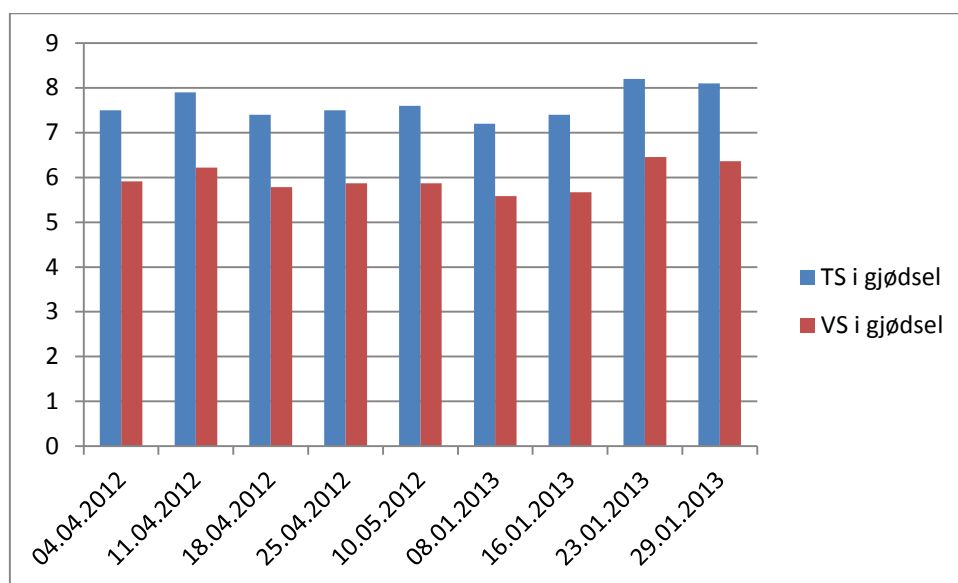
Tabell 2. pH i gjødsel, matavfall, og i dei to reaktorane (R1 og R2).

Dato	Gjødsel	Matavfall	R1	R2
	pH	pH	pH	pH
04.04.2012	8,3		8	8,3
11.04.2012	8,4	4	8,6	7,9
18.04.2012	7,9	4	8,2	8,3
25.04.2012	8,3	4	8,4	8,4
10.05.2012	8,1	4,1	7,8	7,9
08.01.2013	8	4	8	8
16.01.2013	7,9	3,8	8	8
23.01.2013	8	4		
29.01.2013	8,5	4,1	8,2	8
Gjennomsnitt:	8,16	4,00	8,15	8,1

### 3.7.2 Tørrstoff og organisk tørrstoff i storfe gjødsel

Innhaldet av tørrstoff og organisk tørrstoff i husdyrgjødsel var relativt likt for begge periodane (Figur 7). Dette skuldast truleg at fôrmiddela var om lag dei same i begge periodane. Gjennomsnittleg total tørrstoffinnhald var på 7,64 prosent, medan innhaldet av organisk tørrstoff var på 6,0 prosentandelar av våtvekta.

Nokre endringar i tørrstoff var det i midlar tid i gjennom perioden. Lågare innhald av tørrstoff i gjødsel kan skuldast fôrmiddel med høgare vassinnhald eller regnvatn i fortank, eventuelt vasking av fjøs. Fjøsset er også utstyr med mjølkerobot. Denne vil også tilføre ein god del vatn til gjødsel, meir enn kva tilfellet ville vere for båsfjøs.

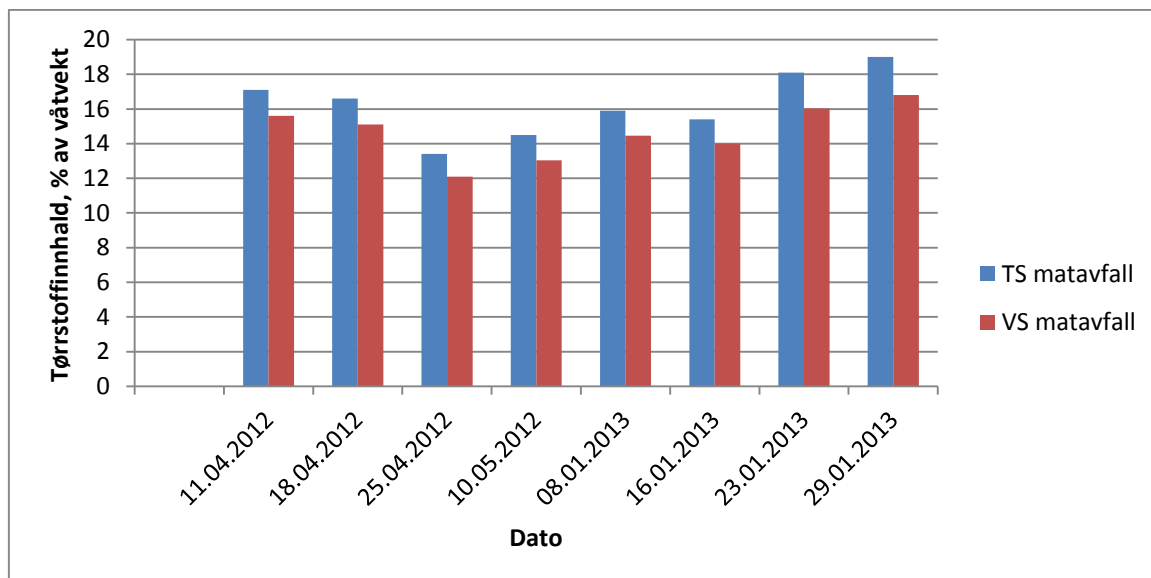


Figur 7. Tørrstoff og organisk tørrstoff i dei to periodane, målt i prosent av våtvekt.

### 3.7.3 Tørrstoff og organisk tørrstoff i matavfallet

Innhaldet av TS og VS i matavfallet varierte noko meir i gjennom prøveperioden (Figur 8). Dei ulike lassa hadde noko ulik samansetjing. I tillegg ville botnfelling i matavfallstanken kunne føre til endringar i samansetjinga av dagsrasjonane. Dette vil normalt ikkje føre til store problem for drifta av anlegget, men kan føre til endringar i den daglege biogassproduksjonen. Dersom innhaldet av oljar i tilleggssubstratet hadde vore høgt, som det til dømes er i fiskeensilasje, og denne oljen hadde skilt seg, og vorte mata inn «rein» i reaktoren, kunne det tenkjast at ein kunne få ustabilitet i reaktoren på grunn av mykje langkjeda feittsyrer ved bruk av mykje tilleggssubstrat. Frå eit anna anlegg vart det rapportert om organisk overbelastning som truleg skuldast meir organisk materiale i substratet enn kva tilfellet hadde vore tidlegare.

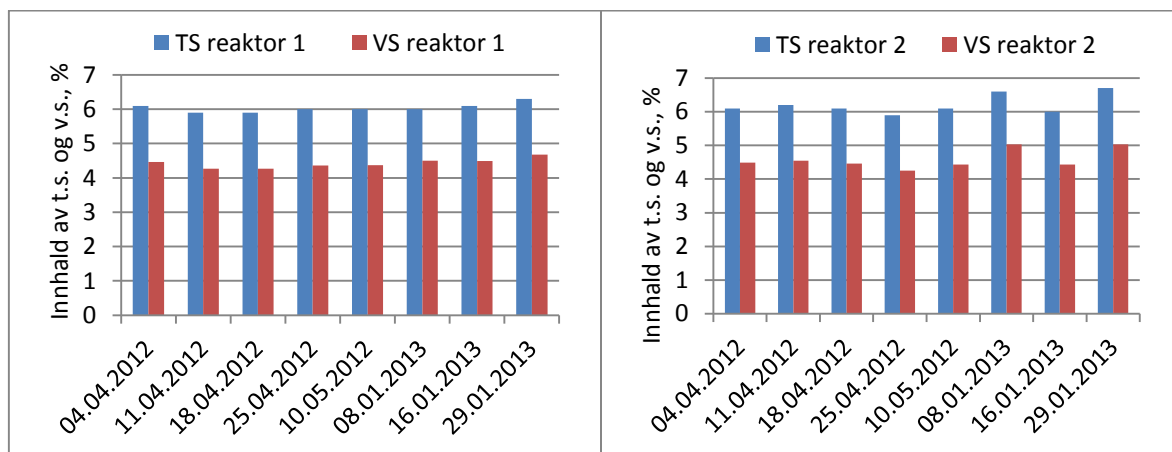
I snitt var innhaldet av tørrstoffinnhaldet i matavfallet 16,25 prosent, medan innhaldet av organisk tørrstoff i snitt var 14,6 prosentandelar av våtvekta.



Figur 8. Innhald av totalt - og organisk tørrstoff i matavfall.

### 3.7.4 Tørrstoff og organisk tørrstoff i rotneresten

Rotneresten har, naturleg nok eit lågare innhald av organisk tørrstoff då ein stor del av tørrstoffet vert omdanna til biogass. Som ein ser er rotneresten frå dei to reaktorane relativt lik (Figur 9). Rotneresten frå reaktor 1 hadde i snitt eit tørrstoffinnhald på i overkant av 6 prosent og eit organisk tørrstoffinnhald på 4,4 prosent. Tilsvarende tal for reaktor 2 er 6,2 prosent og 4,6 prosent. At tørrstoffinnhaldet var høgare i reaktor 2 kan skuldast prosedyren for innpumping, der reaktor 2 vart fylt til slutt. I gjennomsnitt for dei to reaktorane var tørrstoffinnhaldet i rotneresten på 6,1 prosent, medan innhaldet av organisk tørrstoff var på 4,5 prosent.



Figur 9. Innhald av tørrstoff (t.s.) og organisk tørrstoff (v.s.), i prosent av innhaldet, i rotnerest frå reaktor 1 og 2.

### 3.7.5 Omsetjing av organisk tørrstoff i reaktorane.

I det fylgjande dømet vert det sett nærare på nedbrytinga og omdanninga av organisk tørrstoffet (VS - volatile solids) i biogassanlegget. Det er periode 7 som vert omhandla i dei vidare utrekningane, då er ein periode som representerer godt vinterperiodane med høg produksjon, samstundes som ein har fleire analyser som dekkjer perioden. Prøvene for denne perioden vart tekne 16/1-13. I utrekninga vert gjennomsnittsverdiar frå desse analysane nytta. Det er også nytta gjennomsnittsverdiar for rotnerest frå reaktor 1 og 2. I utrekninga er det heller ikkje teke omsyn til reduksjon i substratvolumet i biogassprosessen. Vassdamp i biogassen, metan og koldioksid har masse, men i prosent av den totale massen vert dette svært lite.

I periode 7 vart det dagleg tilført 11,29 m<sup>3</sup> storfegjødsel og 2,01 m<sup>3</sup> matavfall, totalt 13,3 m<sup>3</sup> substrat. Innhaldet av VS, målt i prosent av våtvekt, var på respektive 5,7 og 14 prosent. Det gjennomsnittlege innhaldet av VS i substratet var på 6,93. Dette gav ein dagleg tilførsel på 640 kg VS frå gjødsel og 281 kg frå matavfallet. Såleis vart det dagleg 921 kg organisk tørrstoff. Dette gav ein energiproduksjon på 2386 kWh, eller 2,59 kWh per kg VS tilført.

Rotneresten i periode 7 hadde eit innhald av VS på 4,5 prosent av våtvekta. Dette svarar til ein gjennomsnittleg reduksjon i VS på 35 prosent. Det vart såleis dagleg fjerna 593 kg VS som ikkje hadde vorte omdanna i reaktorane. Differansen, dei 328 kg med VS, stod såleis for gassproduksjonen. Dette gav ein metanproduksjon på 7,3 kWh per kg VS som vart omdanna.

## 3.1 Inhibering i reaktoren

Det vart under forsøket teke ein del prøver for å sjå korleis prosessen i biogassreaktoren fungerte med auka mengder tilleggssubstrat. Det var særleg fokusert på omsetjinga av organisk tørrstoff. Men i tillegg vart det tekne ut tre prøver som vart analysert for langt fleire parametarar for å avdekke moglege inhibering. Det kan ved store mengder tilleggssubstrat, ved høg organisk belastning eller ved bruk av substrat med ugunstig samansetning vere fare for at enkelte stoff vert til stades i så store konsentrasjonar i reaktoren at metandanninga ikkje fungerer optimalt. Dette vert i biogassamheng kalla for inhibering. Dei viktigaste parameterane som vart undersøkt var flyktige fettstoffer, ammoniums-nitrogen, natrium samt pH. Det vart teke ut to prøver frå april 2012 og ei prøve frå slutten av januar 2013 (mellom periode 7 og 8). Dette var alle tre periodar med relativt høg gassproduksjon, med over 2000kWh per dag.

### 3.1.1 Ammonium-N

Høge ammoniums-N-verdiar (TAN-total ammoniacal nitrogen) kan vere eit problem ved bruk av mykje proteinrike substrat. Frå litteraturen vert det hevda at ammoniums-N-verdiar over 700 mg/l kan hemme prosessen, og at prosessen kan stoppe opp ved verdiar over 2000 mg/l. Annan forskning viser at prosessen kan venne seg til høgare verdiar, om ein lang nok opphaldstid. Dette fordi desse metanogene, som særleg nyttegjer seg av hydrogen til metandanninga, har lang formeiringstid, og såleis er lett utsette for utvasking.

Temperatur og pH vil også ha noko å seie for kor sterk påverknad nitrogenet har på prosessen. I ein biogassreaktor vil mineralisert nitrogen hovudsakeleg finns som ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) og ammoniakk



(NH<sub>3</sub>). Det er særleg ammoniakk som hindrar prosessen. Ammonium og ammoniakk ligg i likevekt med kvarandre, der det meste finns som ammonium ved låg temperatur og pH, men ved høgare pH og tempertur vil gå i retning av ammoniakk (Emerson, Russo, Lund, & Thurston, 1975). Til dømes vil 1,26 % av TAN finns som ammoniakk ved pH 7 ved 37°C, medan 28,8 % av TAN vil finns som ammoniakk ved same temperatur ved pH 8,5. For ein termofil reaktor, med temperatur på 55°C, vil andelen ammoniakk vere på 3,75 % og 55,2% for pH-verdiar på respektive 7 og 8,5.

Som ein ser av Tabell 3 var ammoniums-N verdiane kring 2000 mg/l. Dette er truleg godt innanfor kva som er forsvarleg. Ein bør like vel vere observant ved vidare auke av tilleggssubstrat.

Tabell 3. Ammoniacal-N (TAN) i rotnerest frå reaktor 1 og 2, i mg/l.

	R1	R2
	mg TAN/l	mg TAN/l
11.04.2012	1888	2294
25.04.2012	2280	2006
29.01.2013	1890	1876
Snitt:	2019	2059

### 3.1.2 pH

pH i rotneresten frå dei to reaktorane var relativt stabil i dei ulike periodane, med rundt 8 i heile perioden. Det var såleis ikkje noko som tyda på at det var problem med surgang pga organisk overbelastning (Tabell 4). pH i reaktorane bør vere godt over 6,7 (Deublein & Steinhauser, 2008).

Tabell 4. pH i rotnerest frå reaktor 1 og 2.

Dato	R1, pH	R2, pH
04.04.2012	8	8,3
11.04.2012	8,6	7,9
18.04.2012	8,2	8,3
25.04.2012	8,4	8,4
10.05.2012	7,8	7,9
08.01.2013	8	8
16.01.2013	8	8
29.01.2013	8,2	8
Snitt:	8,2	8,1

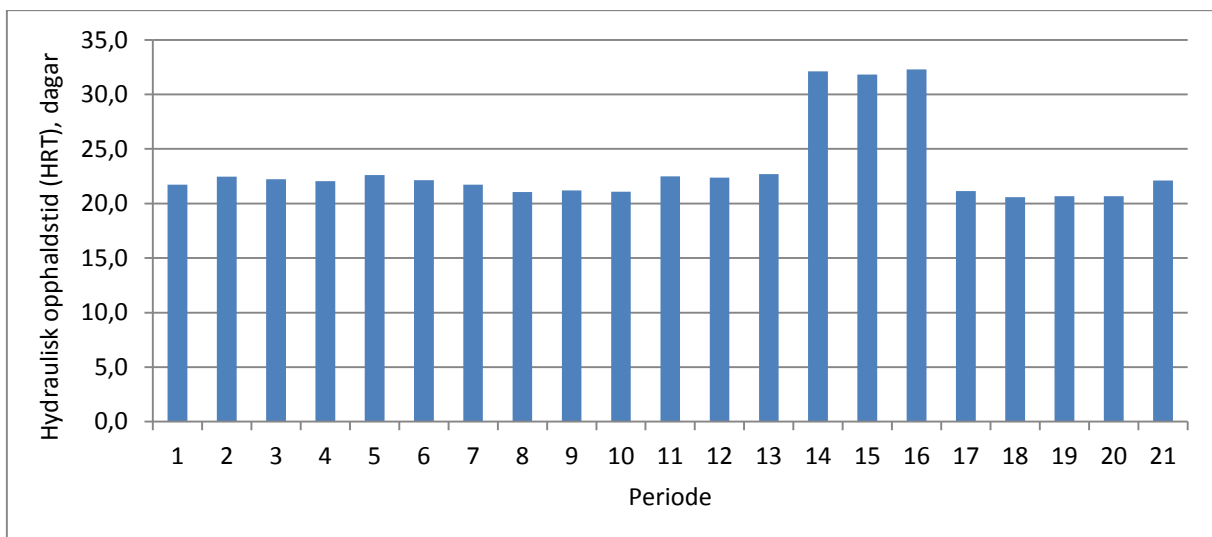
### 3.1.3 Flyktige feittsyrer

Flyktige feittsyrer (VFA – volatile fatty acids) er feittsyrer med seks eller færre karbonatom. VFA vert danna under omdanning av organisk materiale. Dersom omdanninga vidare til metan går for sakte, kan flyktige feittsyrer hope seg opp. Høge verdiar av VFA er såleis eit teikn på ubalanse mellom mengde organisk materiale tilført og reaktoren si evne til å omdanne dei vidare til metan. Ved rask opptrapping av tilførselen av organisk materiale kan ein få ein slik tilstand. Det same kan oppstå ved svært høg organisk belastning over tid. På grunn av bufferkapasiteten til gjødsla kan det hope seg opp ein god del syrer utan at det gjev seg utslag i pH.

### 3.2 Hydraulisk opphaldstid

Den hydrauliske opphaldstida (HRT – Hydraulic Retention Time) til ein biogassreaktor viser kor lenge substratet i snitt er i biogassreaktoren. HRT viser om ein tilfører reaktoren eit høveleg volum substrat. Høg HRT, til dømes over 30 dagar, kan tyde på at ein ikkje tilfører reaktorane nok substrat, og såleis ikkje utnyttar potensialet til reaktoren. Er den hydrauliske opphaldstida kort kan det der i mot vere fare for at dei metandannande mikroorganismene i reaktoren ikkje rekk å formeire seg før dei vert fjerna frå reaktoren. Denne situasjonen vert kalla utvasking. For eit gardsbiogassanlegg vil ei hydraulisk opphaldstid på ikring 20 til 30 dagar vere høveleg. Ein reknar ut den hydrauliske opphaldstida ved å dele det aktive reaktorvolumet på volum tilført substrat per dag.

I utrekningane vart det totale reaktorvolumet sett til 289 m<sup>3</sup>. Dette motsvarar ein fyllingsgrad i reaktorane på 85 prosent, og var gjengs under store delar av forsøket. Som ein ser av Figur 10 var den hydrauliske opphaldstida i periodane med normal drift mellom 20 og 23 dagar. Dette er truleg ei høveleg opphaldstid for dette anlegget, sjølv om omsetjinga av tørrstoff var noko låg. Ei lengre hydraulisk opphaldstid vil føre til at meir av tørrstoffet som vert tilført vert omdanna, men dette vil føre til reduksjon av den totale biogassproduksjonen, då ein må redusere mengde tilført substrat for å auke opphaldstida. I sommar-periodane var den hydrauliske opphaldstida svært lang, med over 30 dagar. Dette viser igjen på den låge produksjonen av biogass.



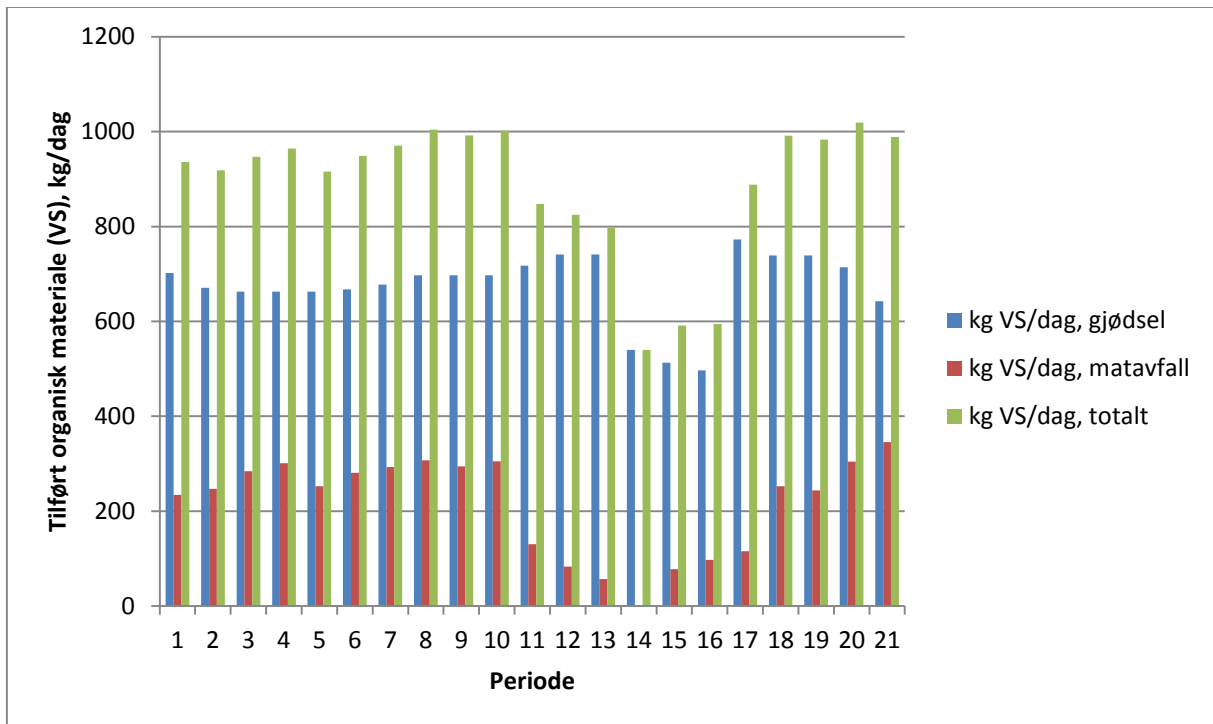
Figur 10. Hydraulisk opphaldstid, målt i dagar, for dei 21 periodane.

### 3.3 Organisk belastning (OLR)

I dei fylgjande utrekningane er det sett på den organiske belastninga av reaktorane i forsøket. Organisk belastning (OLR – Organic Loading Rate) vert målt i kg VS tilført per m<sup>3</sup> aktivt reaktorvolum og dag (kg VS / m<sup>3</sup> · d). OLR er eit mål på kor hardt ein belastar reaktoren.

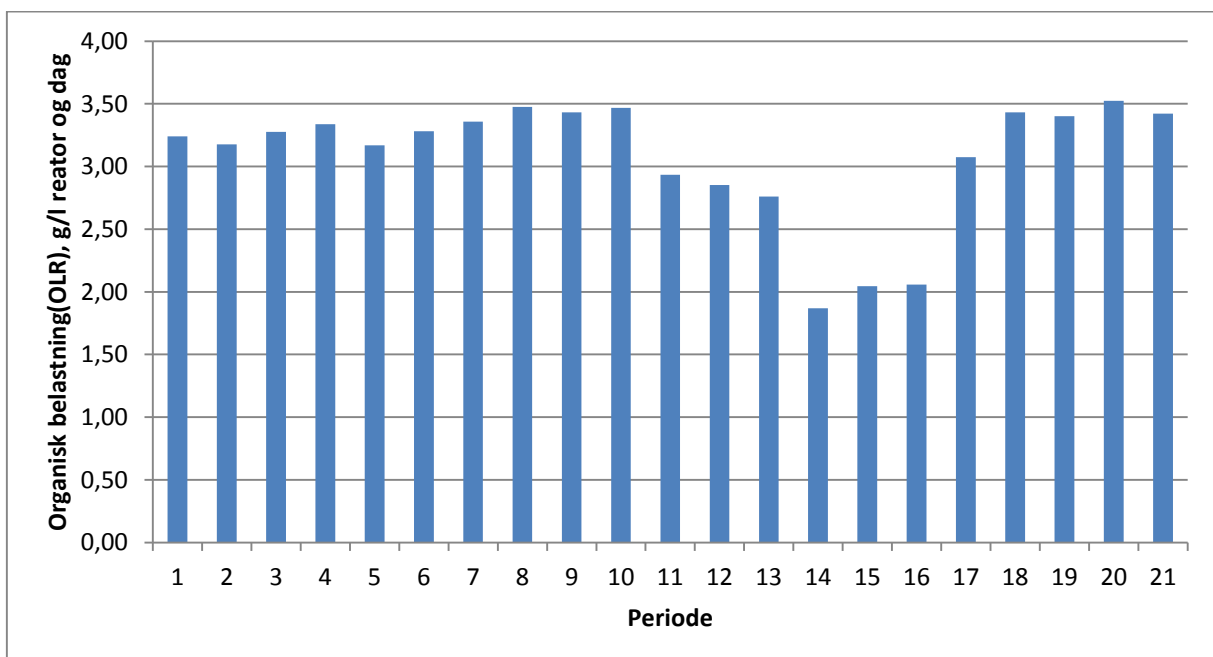
Etter som ein ikkje har målingar av VS frå alle periodane, og dei målingane ein har er relativt jamne, vart gjennomsnittleg VS-innhald i substrata nytta i utrekningane. Det aktive volumet til reaktorane er i utrekningane også her sett til 289m<sup>3</sup>, sjølv om det tidvis kunne oppstå mindre endringar i nivået i reaktorane. For gjødsla var VS, målt i prosent av våt vekt, i snitt 6 prosent. For matavfall var VS i snitt 14,6 prosent.

Som ein ser av Figur 11 kom det meste av det organiske tørrstoffet frå gjødsel. Ei forklaring kan vera at dette tørrstoffet er mindre omsetjeleg.



Figur 11. Mengd tilført av dei ulike substrata, kg VS per dag.

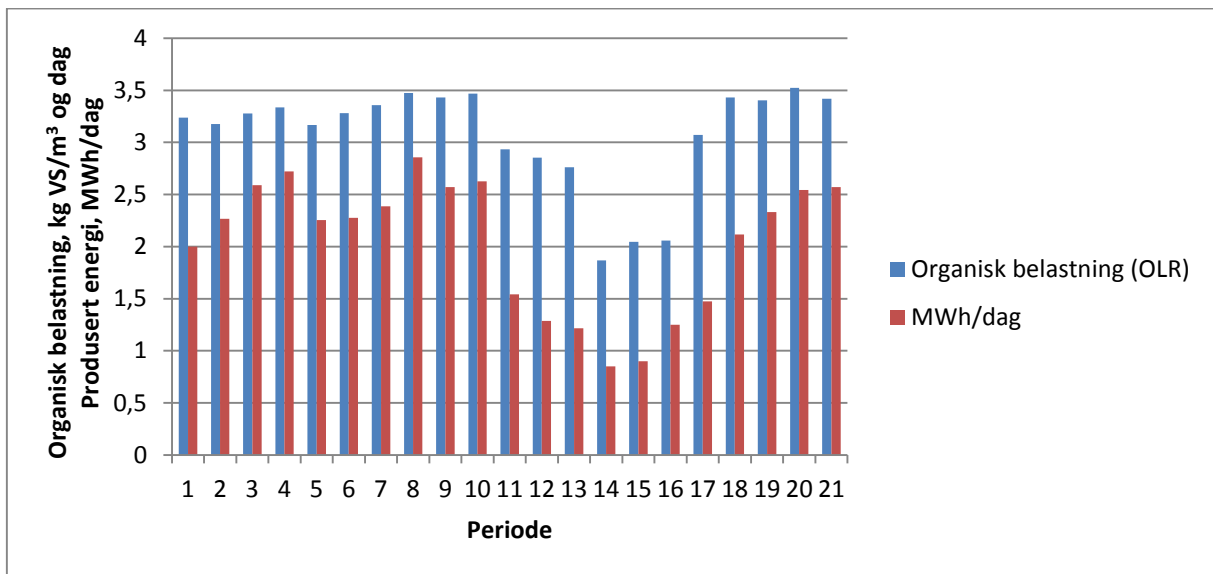
Figur 12 viser organisk belastning (OLR) for dei 21 periodane. For dei fleste periodane låg denne mellom 3 og 3,5. Dette er truleg noko lågt for dette anlegget. Noko meir matavfall kunne såleis med fordel vore tilført. I periodane er det tilført berre storfegjødsel, noko som gjev ein reduksjon i OLR.



Figur 12. Organisk belastning i dei 21 periodane.

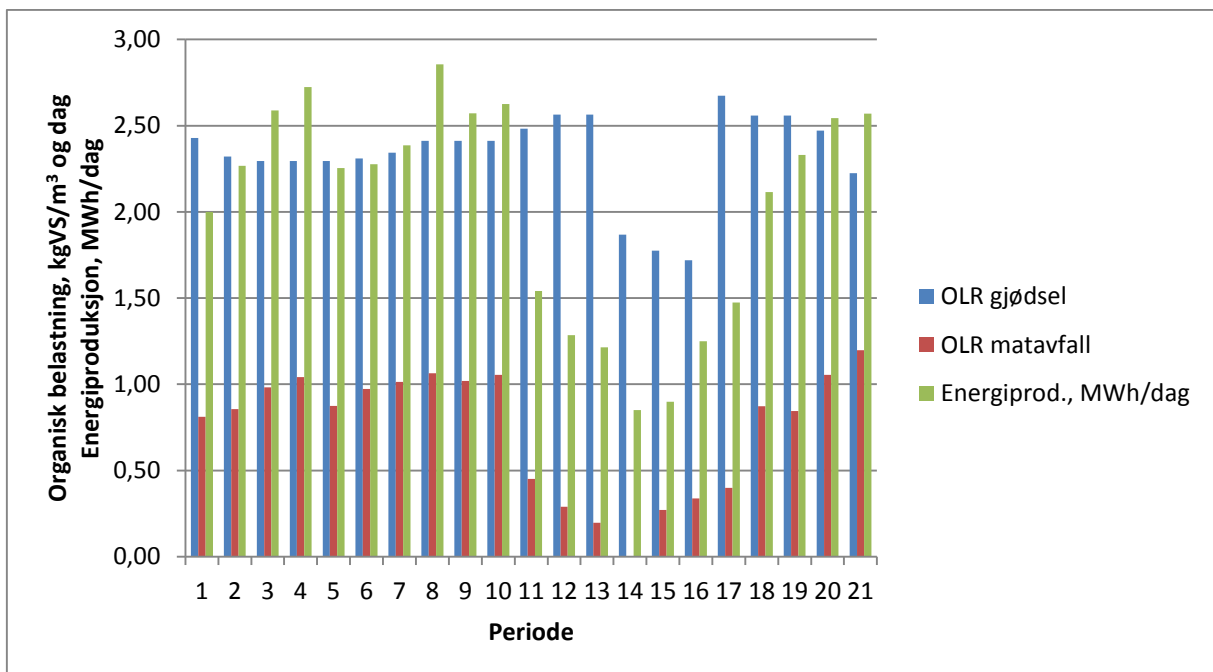
### 3.4 Energiproduksjon og organisk belastning

Som ein ser i Figur 133 er energiproduksjonen nært knytt til den organiske belastninga.



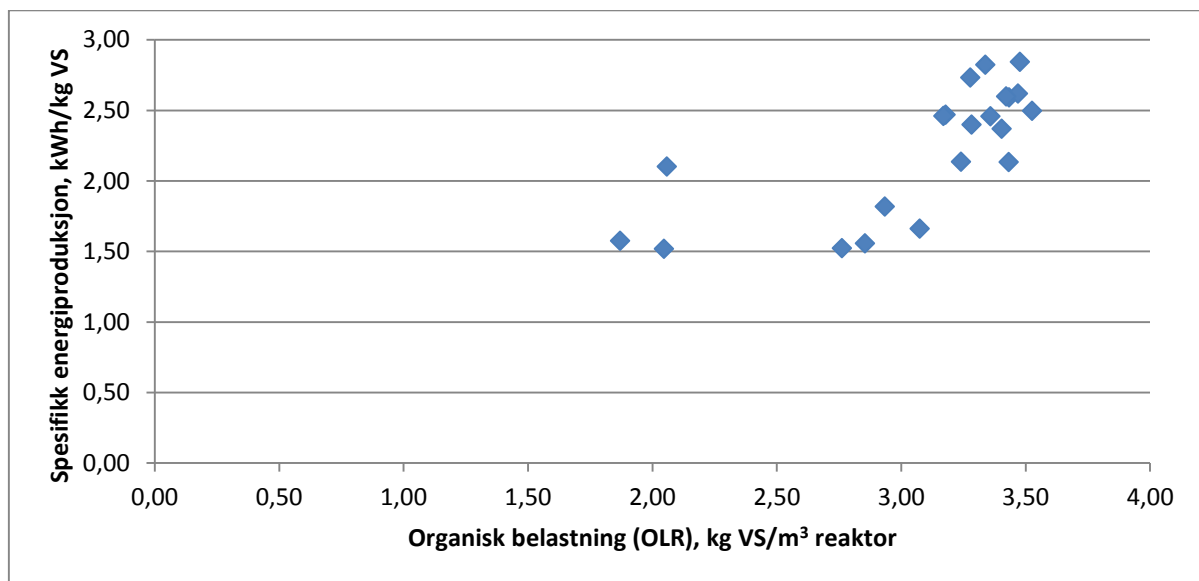
Figur 13. Organisk belastning og produsert energi i dei ulike periodane.

Ser ein på bidraget til den organiske belastninga frå dei ulike substrata, knytt opp mot energiproduksjonen, ser ein endå tydeligare kor viktig matavfallet er (Figur 14).



Figur 14. Organisk belastning i dei ulike substrata og produsert energi fordelt på dei ulike periodane.

Figur 155 viser spesifikk energiproduksjon som funksjon av organisk belastning. Figuren viser at energiproduksjonen aukar med auka organisk belastning. Det er matavfall som utgjer auken frå ca. 2 kg VS/m<sup>3</sup> og dag.



Figur 15. Energiproduksjon versus organisk belastning.

## 4 Energifordeling

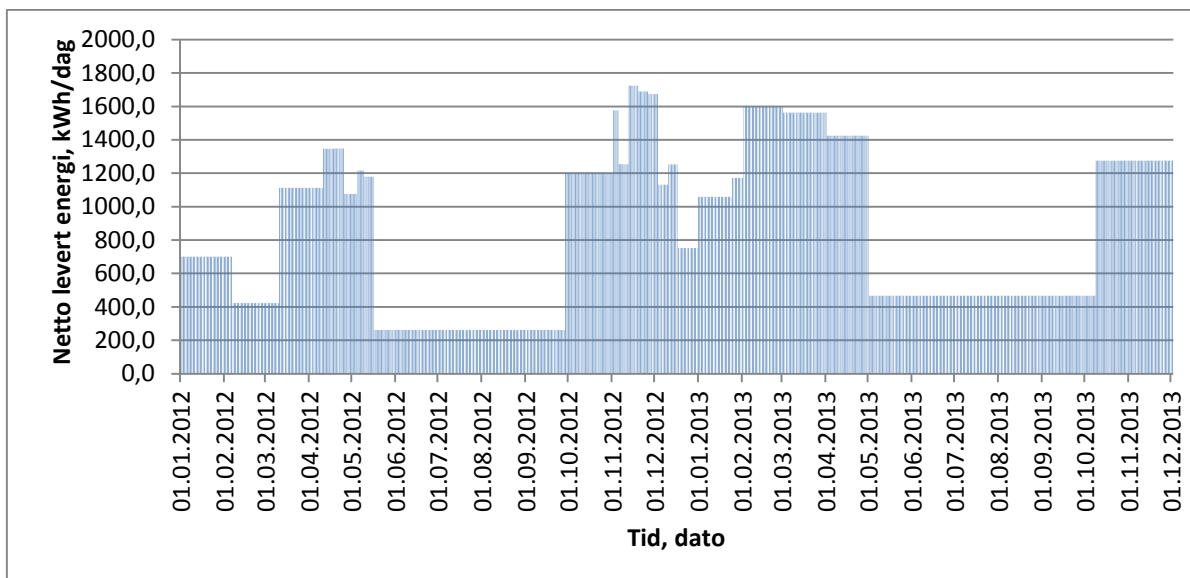
Ein del av energien som vert produsert i eit biogassanlegg går med til å drifte anlegget. Til oppvarming av nytt substrat og til å dekke opp for varmetap frå reaktorar og røyrleidningar går det med store mengder termisk energi. Til røring, pumping og instrumentering vil det gå med elektrisk energi, som må hentast frå straumnett.

Ved Tomb vart den totale energiproduksjonen målt rett etter gasskjelen, medan energien som vart levert, vart målt i internat og undervisningsbygg. Energi som gjekk tapt i leidningane mellom bygga er såleis rekna inn under energibehovet til anlegget.

Det elektriske energiforbruket vart notert med ujamne mellomrom i perioden 9/11-12 til 11/12-13. Forbruket varierte då i frå 51,3 kWh per dag til i overkant av 103,7 kWh per dag, med eit snitt på 62,3 kWh/dag. I dei vidare utrekningane er difor eit elektrisk energiforbruk på 62,3 kWh/dag nytta.

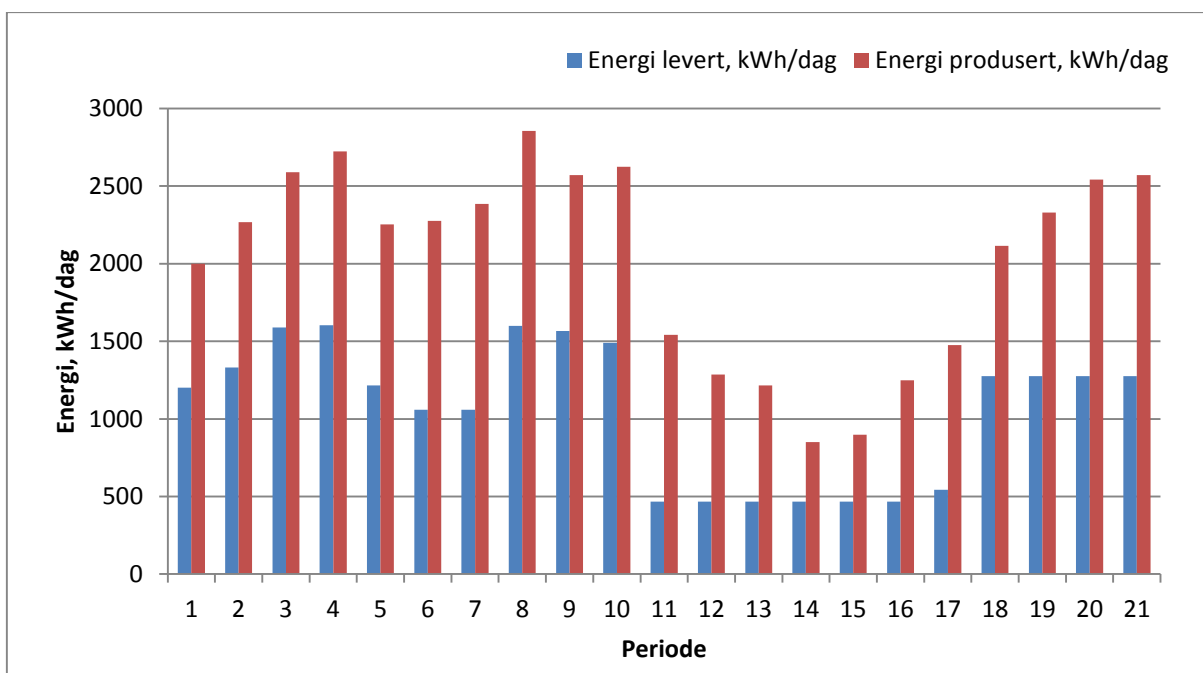
### 4.1 Netto energi levert

Netto energi frå anlegget var den energien som vart levert undervisningsbygget og internatet. Denne vart målt ved varmevekslarane på bygga. Desse verdiane vart notert ned med, med tida mellom noteringa varierte. I utrekningane vidare er verdiane frå dei to energimålarane summert. Figur 166 viser variasjon over året, der energileveransar frå periodar om sommaren, når ein ikkje brukar internatet, er låge. Det same gjentek seg i 2013, men her er det ikkje målt aukning i energiforbruk før midten av oktober.



Figur 16. Netto levert energi som funksjon av dato.

Figur 177 viser totalmengde energi produsert, samt energi levert til undervisningsbygg og internat i dei 21 periodane. Som ein kan sjå, var det frå periode 11 og vidare langt mellom målaravlesingane.

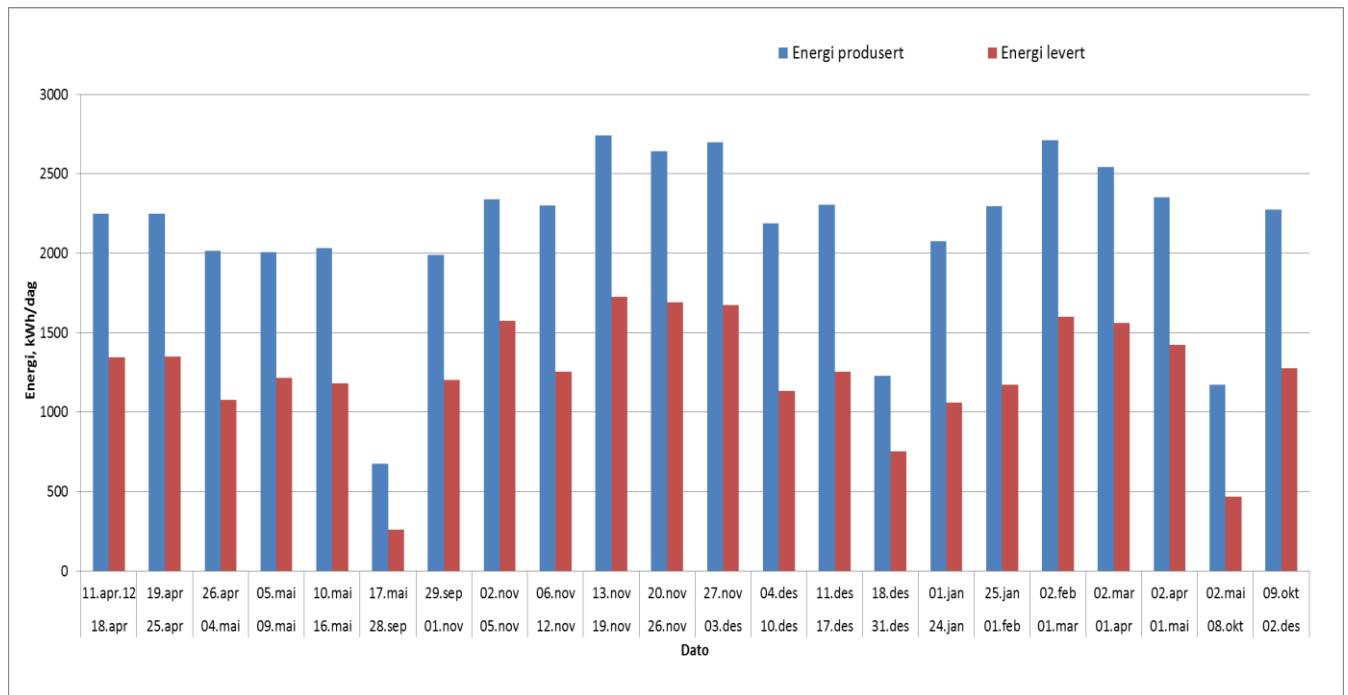


Figur 17. Energi produsert og energi levert i dei ulike periodane.

I Figur 18 er måleperiodane for levert energi nytta. Gjennomsnittleg dagleg energi levert, samt forbrukt, er vist. Som ein ser av figuren er det sterk samanheng mellom energi produsert og energi levert. Samstundes ser ein at ein relativt stor del av energien går med til å dekke opp energiforbruk ved anlegget. Det termiske energiforbruket varierte i periodar med normal drift mellom 32,6 prosent

og 49,1, medan energiforbruket om somrane var på over 60 prosent av energien som vart produsert. Grunnen til dette var at den totale energiproduksjonen då var svært låg. I snitt for periodane var det termiske energiforbruket 43,3 prosent av den produserte energien. I tillegg kjem det elektriske energiforbruket som i snitt var på 62,3 kWh/dag. Ein må også huske på at tapet i røyrløydning mellom biogassanlegg og internat/undervisningsbygg også er teke med i energiforbruket. Det reelle energiforbruket i anlegget er difor noko lågare.

Det kan også vere verdt å merke seg perioden 18 til 31 desember 2012. Det var då problem med fyrkjelen som var nede i heile romjula.



Figur 18. Produsert og levert energi per dag fordelt på dato.

Tabell 5 på neste side viser berekna internt energiforbruk.

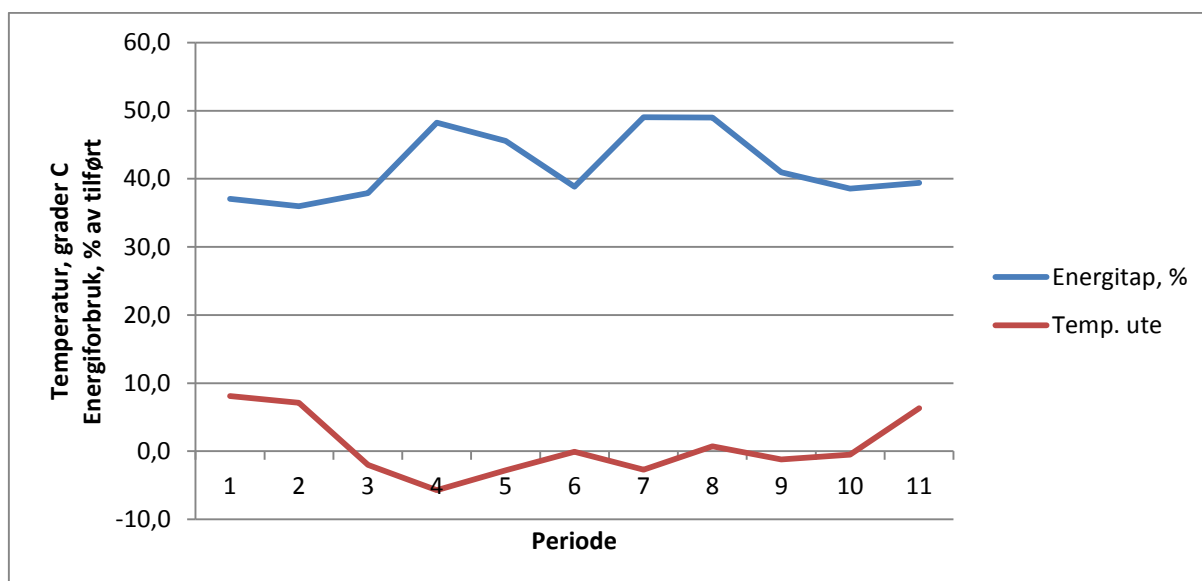


Tabell 5. Bereknar energiforbruk i prosent av tilført energi i anlegget medrekna varmetap i røyrleidningar og energiforbruk per m<sup>3</sup> reaktor.

Frå og med	Til og med	Energi levert, kWh/dag	Energi produsert, kWh/dag	Internt energiforbruk, kWh/dag	Internt energiforbruk, %	Energiforbruk, kWh/m <sup>3</sup> reaktor
11.apr	18.apr	1345,8	2247,1	901,4	40,1	3,02
19.apr	25.apr	1347,9	2248,6	900,7	40,1	3,02
26.apr	04.mai	1076,8	2016,7	939,9	46,6	3,15
05.mai	09.mai	1215,4	2005,9	790,5	39,4	2,65
10.mai	16.mai	1180,0	2034,4	854,4	42,0	2,87
17.mai	28.sep	261,7	673,8	412,1	61,2	1,38
29.sep	01.nov	1201,5	1988	786,5	39,6	2,64
02.nov	05.nov	1576,3	2340	763,8	32,6	2,56
06.nov	12.nov	1253,6	2300	1046,4	45,5	3,51
13.nov	19.nov	1724,6	2740	1015,4	37,1	3,41
20.nov	26.nov	1689,7	2640,1	950,4	36,0	3,19
27.nov	03.des	1675,0	2697,1	1022,1	37,9	3,43
04.des	10.des	1131,9	2187,1	1055,2	48,2	3,54
11.des	17.des	1253,1	2302,8	1049,7	45,6	3,52
18.des	31.des	751,6	1229,5	477,9	38,9	1,60
01.jan	24.jan	1058,3	2077,3	1019,0	49,1	3,42
25.jan	01.feb	1172,1	2297,4	1125,3	49,0	3,78
02.feb	01.mar	1599,7	2709,3	1109,6	41,0	3,72
02.mar	01.apr	1562,8	2543,9	981,1	38,6	3,29
02.apr	01.mai	1425,0	2351,8	926,8	39,4	3,11
02.mai	08.okt	466,6	1172,76	706,1	60,2	2,37
09.okt	02.des	1276,4	2276,7	1000,3	43,9	3,36

Når ein reknar om slik at ein får energiforbruk per m<sup>3</sup> substrat tilført, får ein eit snitt over periodane på 244 MJ/m<sup>3</sup> +/- 45. Dette er ligg innanfor forbruket som vart estimert frå anlegget på Åna (Fjørtoft, Morken, Hanssen, & Briseid, 2014), sjølv om det ligg i øvre intervallet.

Lufttemperaturen vart også logga ved anlegget i ein del av måleperioden. I Figur 19 er gjennomsnittleg lufttemperatur og prosentvis energiforbruk for periodane frå og med 13. november 2012 til og med 1. mai 2013 vist. Som tidlegare nemnt vil det vere mange faktorar som påverkar det prosentvise energitapet. Det vil også vere forseinkingar i systemet som kan fordreie data. Ein ser like vel ein trend i datasetta, med at låg temperatur gjev høgt energiforbruk.



Figur 19. Temperatur og energiforbruk for nokre periodar.

## 4.2 Energiproduksjonen på Tomb over eit år.

Frå og med 3 desember 2012 til og med 2 desember 2013 vart det totalt produsert 656 185 kWh på anlegget på Tomb. Dette var i form av varmt vatn. Av denne energien gjekk 312 874 kWh, eller 47,68 prosent av den totale energiproduksjonen med til å dekke opp for varmetap frå reaktorar og røyrleidningar samt varme opp nytt substrat. Til internat og undervisningsbygget vart det såleis levert til saman 343 311 kWh. Ein netto energiproduksjon på 52,32 prosent er noko lågt. Dette har truleg samanheng med måten anlegget er konstruert på, samt måten det vart drifta. Det var til dømes ikkje montert varmevekslar for gjenvinning av varme frå substrata. Energitalpet frå overflatene vil heller ikkje vere avhengige av energiproduksjonen, men av temperatur, areal av flater og isolasjonsevna til desse flatene.

### 4.2.1 Elektrisk forbruk

I tillegg gjekk det også med ein god del elektrisk energi, hovudsakeleg til pumping og røring. Denne var utrekna til i snitt å vere på 62,3 kWh per dag. På eit år vart dette til saman 22739,5 kWh, eller 3,465 prosent av den totale energiproduksjonen.

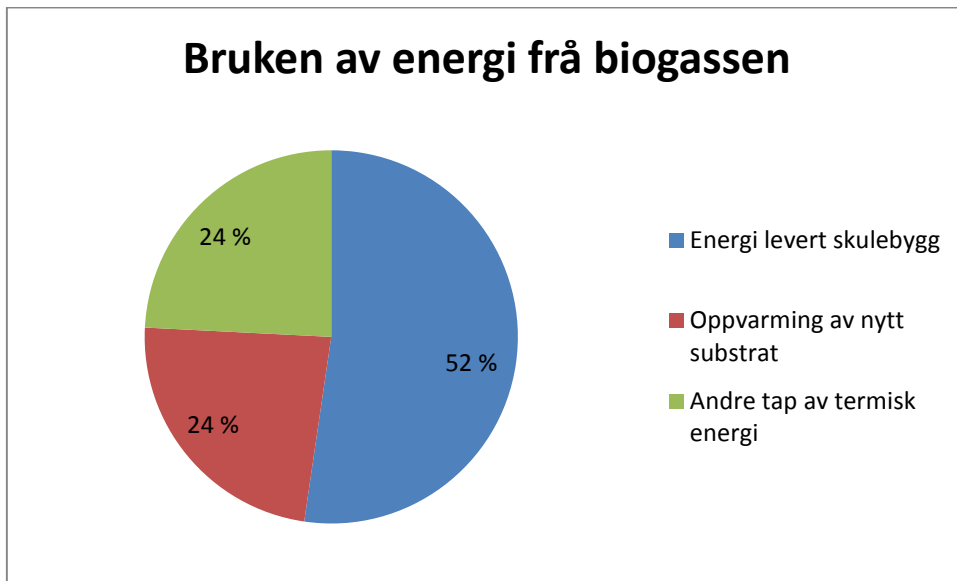
### 4.2.2 Oppvarming av nytt substrat

Oppvarming av nytt substrat krev mykje energi. Ein varmevekslar kunne truleg redusert energibehovet betrakteleg. I reknestykket under vil ein gå nærare inn på kor mykje energi som går med til å varme opp nytt substrat. Tomb har ein årsmiddeltemperatur på 5,4°C. Ein kan såleis anta at substratet har denne temperaturen når det kjem inn til anlegget. Reaktortemperaturen var sett til å vere 37°C, men var sjeldan over 34°C. Substratet måtte såleis varmast opp 28,6°C for å nå denne temperaturen. I reknestykket vert varmekapasiteten til vatn nytta. Ein antek vidare at tettleiken til substrata er 1 kg per liter. Varmekapasiteten til vatn er på  $4,186 \cdot 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ . Dette svarar til 1,1628 kWh per °C per m<sup>3</sup> substrat. Då substrata i snitt måtte varmast 28,6°C, gjev dette ein energibruk på

33,256 kWh per m<sup>3</sup> substrat. Dette er over ein tredjedel av energien ein kan få ut av til dømes storfe gjødsel.

Per år vart det nytta til saman 4633 m<sup>3</sup> substrat (dosert mengde). Totalt energiforbruk for oppvarming av nytt substrat vert såleis 154 062 kWh, eller 49,2% av det termiske energiforbruket. Ved anlegget på Tomb går såleis over 50% av det termiske energiforbruket til å dekke opp for andre varmetap frå anlegget, samt energitap i overføringsleidninga til internatet. Dette er mykje.

I Figur 20 er fordelinga i bruken av den termiske energien ved Tomb vist. Ein ser der at neste halvparten av energien går tapt.



Figur 20. Bruken av energien frå biogas.

## 5 Laboratorieforsøk med fire reaktorar

Laboratorieforsøket vart gjennomført hausten 2012 og våren 2013 som masteroppgåva til Magnus Gjetmundsen, NMBU (Gjetmundsen, 2013). Etter som Tomb landbruksskole har eit typisk gardsanlegg, der det vert produsert ein fast mengde storfegjødsel, var ein av føresetnadane i forsøksoppsettet at mengda gjødsel var fast og at ein varierte mengde matavfall for å auke gassproduksjonen.

### 5.1 Forsøksreaktorane

Forsøksreaktorane (Figur 21) hadde kontinuerlig omrøring (CSTR). I forsøket ble reaktorene matet en gang per dag, etter som dette måtte gjøres manuelt. Reaktorene var elektrisk oppvarmet og hadde en temperatur på  $37 \pm 2$  °C. Volumet på reaktoren var 25 liter, men bare 15 liter ble fylt opp med substrat. Resterende 10 liter ble brukt som bufferrom for gassen og eventuelt skum. Det var koblet til gassmålere, som målte volum produsert gass. Innholdet av metan og karbondioksid i gassen ble analysert 8 ganger i døgnet i en gasskromatograf (GC), (SRI gas chromatography instrument, Model 8610).



Figur 21. Forsøksreaktorar (CSTR reaktorar) med gasssteljar, varmebelte, og tilførringsrør.

Det var to mål med dette forsøket. For det fyrste å verifisere produksjonen i fullskala med forsøk i laboratorium. Dette kunne gje betre talgrunnlag for kor stor produksjonen var. For det andre kunne ein finne meir ut om ein kunne blande inn meir matavfall, og korleis auken i produksjon ville vera. Forsøket vart gjort i to forsøksseriar, der matavfall utgjorde 0, 14,6, 24,5 og 32,2 % av tilført materiale. Sidan husdyrgjødselmengda i reaktorane var konstant, vart opphaldstida redusert ved auka innblanding av matavfall. Den hydrauliske opphaldstida var lik med den på Tomb, slik at ved 0 innblanding var den 25 dagar. Ved auka innblanding var den 22, 19 og 17 dagar noko som tilsvara organisk belastning på 1,8, 3,0, 4,0 og 5,0 g(VS)/(l\*dag) for opphaldstidene 25, 22, 19 og 17 dagar.

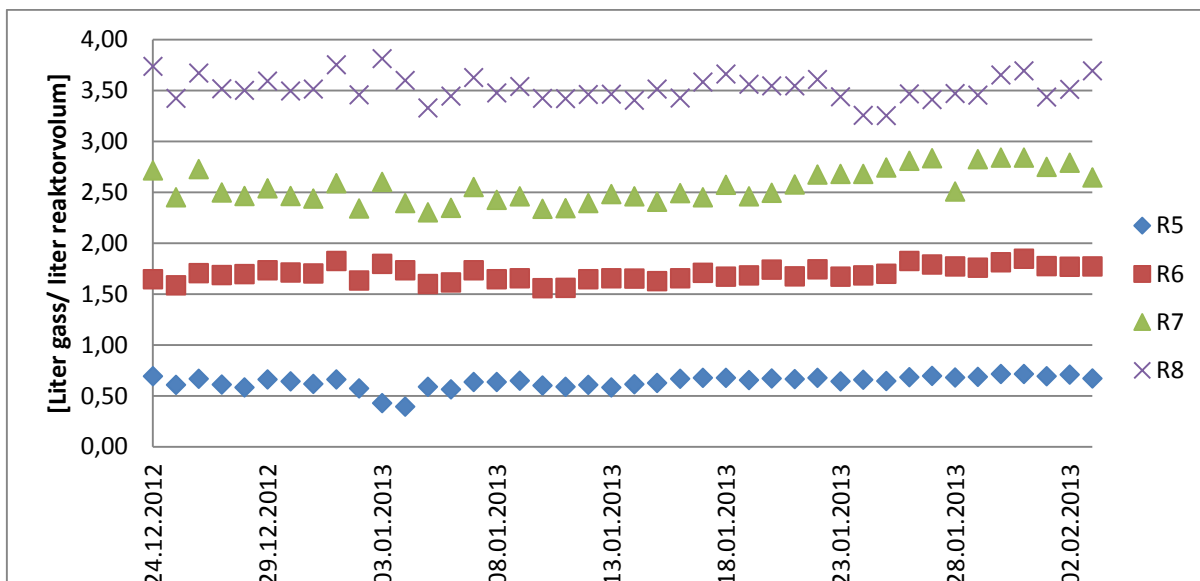
I den andre forsøksserien vart organisk belastning auka til 4 g(VS)/(l\*dag). I denne serien vart opphaldstida sett til 17 dagar på alle fire reaktorane, og innblanding av matavfall var 45, 58, 72 og 85 % av husdyrgjødsel.

## 5.2 Resultat

Frå **Error! Reference source not found.**22 kan vi og sjå ein klar samanheng mellom auka OLR og biogassutbytte. Volumetrisk metanproduksjon steig frå 0,38 liter metan per liter reaktorvolum i reaktoren med berre storfejødsel til 1,05, 1,59 og 2,21 liter metan per liter reaktorvolum i reaktorane med respektive 14,6, 24,5 og 32,2% matavfall innblanda. Spesifikk metanproduksjon ble bestemt til 0,209, 0,350, 0,395 og 0,438 l(CH<sub>4</sub>)/(g(VS)), i reaktorane med innblanding av 0, 14,6, 24,5 og 32,2 % matavfall.

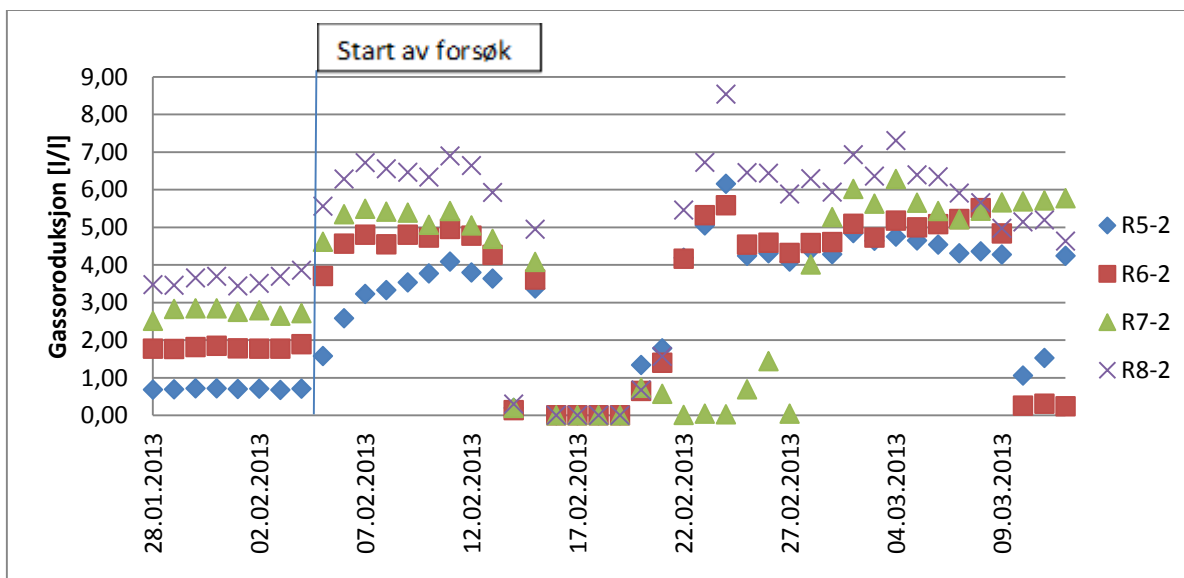
Konverterbar energi frå organisk del av storfejødsla vart berekna til 2,3 kWh per kilo VS og for matavfall til 6,2 kWh per kilo VS. Matavfall som tilleggs-substrat vil vera svært veileigna i gardsbaserte biogassanlegg. Matavfall hadde om lag tre gonger så mykje energi pr kilo VS og var om lag fire gonger så stor del VS. Det gir en energitetthet på 12 gonger høgare enn for storfejødsel. Derfor er det meir hensiktsmessig å frakte matavfallet enn storfejødsla.

Forsøka viser at ein auke frå 14,6 % matavfall innblanda til 32,2 % kan gi en auke av metanproduksjonen på hele 110 %.



Figur 22. Biogassproduksjon, liter biogass per liter reaktor, frå veke 4 til veke 9. R5= husdyrgjødsel, R6=14,6 % matavfall, R7=24,5 % matavfall og R8=32,2 % matavfall (Etter Gjetmundsen, 2013).

Figur 233 viser gasproduksjonen ved auking av matavfallsinnblanding. Pga. brann i laboratoriet var det eit opphald i forsøka frå 12.2 til 22.2. Reaktoren som fekk mest matavfall hadde ein nedgang i pH på slutten av forsøket. Det syner at ein organisk belastning på 7 g VS/l og dag fekk opphoping av flyktige feittsyrer. Dei andre reaktorane viste stabil pH, noko som syner at ein godt kan blande inn meir matavfall inntil ein organisk belastning på ca. 6 g VS/l og dag.



Figur 23. Biogassproduksjon, liter biogass per liter reaktor, laboratorieforsøk del 2, frå veke 4 til veke 13. R5= 45 % matavfall, R6=58 % matavfall, R7=72 % matavfall og R8=85 % matavfall (Etter Gjetmundsen, 2013).

## 6 Diskusjon

Frå og med 3 desember 2012 til og med 2 desember 2013 vart det totalt produsert 656 185 kWh på anlegget på Tomb. Dette var i form av varmt vatn. Av denne energien gjekk 312 874 kWh, eller 47,68 prosent av den totale energiproduksjonen med til å dekke opp for varmetap i røyrleidning samt varme opp nytt substrat. Til internat og undervisningsbygget vart det såleis levert til saman 343 311 kWh. Ein netto energiproduksjon på 52,32 prosent er noko lågt. Dette har truleg samanheng med måten anlegget er konstruert på, samt måten det vart drifta. Det var til dømes ikkje montert varmevekslar for gjenvinning av varme frå substrata. Energitalet frå overflatene vil heller ikkje vere avhengige av energiproduksjonen, men av temperatur, areal av flater og isolasjonsevna til desse flatene.

Ein varmevekslar kunne truleg redusert energibehovet betrakteleg. Dersom ein kunne varme opp innkomande substrat 15°C med det utgåande substratet, ville det på årsbasis utgjere

I reaktorforsøket vart blandinga som vart tilført reaktor 14,6 volumprosent matavfall den som var mest samanliknbar med fullskala forsøket. Det vart i denne reaktoren tilført 14,6 volumprosent matavfall i storfe gjødsel, eller 99,5 gram matavfall til 580 gram storfe gjødsel. Dette gav med ei hydraulisk opphaldstid på 21,62 dagar og ei organisk belastning på 2,98 kg VS per m<sup>3</sup> reaktorvolum.

Dette kan samanliknast med periodane 2 og 5, der den organiske belastninga var på respektive 3,18 og 3,17. Dette gav ein spesifikk biogassproduksjon på 2,47 og 2,46 kWh per kg VS.

Samanhalde ein resultata frå dokumentasjonen av forsøket med resultata frå reaktorforsøket, ser ein at det er eit stort potensiale for auke biogassproduksjonen ved hjelp av matavfall. Samstundes vil for mykje matavfall lett føre til ustabilitet i prosessen. Optimal styring av anlegget vil difor vere svært viktig. Doseringa av substrat vart gjort ved at ein styrte tida pumpa gjekk. Når gummirotorane i pumpa var slitt, slik at det vart internt lekkasje, kunne det lett verte tilført mindre volum substrat, utan at dette vart oppdaga.

Selv om rammefaktorene ved reaktorforsøket skal ligge så tett opptil rammene ved biogassanlegget til Tomb som mulig er det en del parameter som er forskjellige. Viktigste forskjell er størrelsen, 289 m<sup>3</sup> mot 15 liter. Innmatingene ved Tomb er automatiske, der hver reaktor blir matet 3 – 4 ganger hver dag. I forsøksreaktoren er det manuell mating en gang hver dag.

Substratet som brukes på Tomb kommer rett fra fjøset, hvor sammensetningen kan variere. Matavfallet blir levert regelmessig, det varierer også fra uke til uke. I forsøksreaktoren på den andre ble det hentet matavfall og kugjødsel og satt på kjølerom, slik at sammensetningen skulle variere minst mulig.

Det var litt usikkerheit rundt kor mykje matavfall som kunne tilførast utan at biogassprosessen vart ustabil. I reaktorforsøket vart det gjort erfaringar som gjorde at ein turte å auke mengda matavfall ved anlegget. Dette førte, som ein ser, til sterkt auka gassproduksjon. Samanliknar ein til dømes periode 1 og 4, vart det produsert over 36 prosent meir biogass i periode 4, ved bruk av 0,45 m<sup>3</sup> matavfall ekstra. Dette vil ha mykje å seie for økonomien til anlegget.

Dersom ein samanliknar periode 1 og 8 er skilnadane endå større. Ved bruk av om lag same mengde storfe gjødsel i dei to periodane, 11,7 og 11,62 m<sup>3</sup> per dag, men ved å auke doseringa av matavfall frå 1.61 til 2,1 m<sup>3</sup> per dag, auka biogassproduksjonen frå 1999 kWh per dag, til 2856 kWh per dag. Dette

motsvarar ein auke på 42,9 prosent. Om ein antok års-kontinuerleg gassproduksjon, ville denne auken føre til over 300 000 kWh å fordele kostnadane på. Dette kan ha mykje å seie for økonomien til anlegget.

Det var ein del problem under dokumentasjonen. Ein del av problema skuldast sjølve dei tekniske komponentane i anlegget. Eit anna problem har vore korleis målingane kunne gjerast. Dei tekniske problema var til dels mangel på gasslager. Einaste gasslager var «headspace» - luftrommet mellom gjødseloverflata og toppduk. Dette var for lite, og i periodar med større gassproduksjon enn brennarkapasitet, gjekk en del gass ut om overtrykksventilen. Eit enkelt tiltak kan vera eit eige gasslager. I dette anlegget var det berre ei pumpe som vart brukt til både innpumping av nytt substrat og utpumping av ferdig behandla biorest. Dette gjer at noko materiale vil gå ubehandla rett ut til sluttlager. Det har allereie vore diskutert at innblanding av matavfall varierte. Regulering etter nivået i tanken vil truleg vore ei betre løysing. Det spesielle med anlegga til Biowaz er at ein i desse nyttar eit vasslås-tetning mellom reaktor og toppduk. Denne treng oppvarming, og noko energi kunne difor vore spart dersom ei anna løysing hadde vore valt.

Energien frå gassbrennaren blir brukt i 7 varmesløyfer, to til botnoppvarming av reaktorane, to til oppvarming av vasslås, ei til oppvarming av fortanken for gjødsel, ei oppvarming av matavfall, og ei til fjernvarmeanlegget. Systemet er bygd opp slik at mengda med energi som til ei kvar tid går til kvar av sløyfene ikkje kunne bereknas, slik ein valte å bruke berre den totale energien.



## 7 Konklusjon

Prosjektet avdekka eit potensiale for å auke biogassproduksjonen ved Tomb. Energiproduksjonen ved biogassanlegget er i dag like vel betydeleg. På eit år vart det produsert 656 185 kWh i form av varmt vatn (skorsteinstep ikkje medrekna). Dette motsvarar om lag 110 000 m<sup>3</sup> biogass. Av denne energien gjekk 47,7 prosent med til å dekke opp for internt termisk forbruk ved anlegget. Om lag halvparten av denne energien gjekk med til å dekke opp for oppvarming av nytt substrat, medan den andre halvparten gjekk til varmetap frå reaktorar og rørleidningar. Netto energiproduksjon, det som kunne nyttast utanfor anlegget, var såleis på berre vel 50 prosent. Dette er noko lågt.

Energimengda som går til å dekke tap frå overflater på anlegget, kan reduserast ved å isolere anlegget betre. Færre og større reaktorar vil også bidra positivt. Ved anlegget på Tomb er det mange små varmekretsar, som til saman brukar relativt mykje energi. Når det gjeld energi til oppvarming av nytt substrat, ville det vere ein stor fordel å ha varmevekslar i fortanken, slik at ein kan nytte seg av varmeenergien i det utrotna substratet.

Den enklaste måten å redusere det prosentvise energitapet er ved å auke biogassproduksjonen. Dette vart også gjort under dokumentasjonsperioden. Energibehovet for oppvarming av ei volumeining matavfall er om lag det same som for ei volumeining husdyrgjødsel. Biogasspotensialet i matavfallet vil derimot ofte vere over 10 gongar av det ein får ut av husdyrgjødsel. Frå laboratorieforsøket fann ein at storfegjødsel gav eit energiutbytte på 2,3 kWh per kg organisk tørrstoff (VS), medan matavfallet gav heile 6,2 kWh per kg VS. Når ein i tillegg veit at innhaldet av VS i matavfall er heile fire gongar så høgt som i storfegjødsel, ser ein at matavfall er svært velegna som tilleggssubstrat i gardsbaserte biogassanlegg. Laboratorieforsøka viste at ei auke i tilført mengde matavfall frå 14,6 prosent til 32,2 prosent, gav ei auke i metanproduksjonen på heile 110 prosent.

Ein del svakheiter ved anlegget vart utbetra i løpet av dokumentasjonsperioden. Mellom anna vart brennaren skifta til ein større modell, og styringa av varmesløyfene betra. Like vel gjekk ein del biogass tapt ved at han bobla ut gjennom vasslås over reaktorar då ein ikkje klarte å bruke han til rett tid. Det var mellom anna problem med samkøyringa mellom sirkulasjonspumpe for varmt vatn og gassbrennaren.

Dersom ein kunne lagre energi i periodar med lågt forbruk, ville ein også redusert mengda gass som boblar ut, og truleg betra økonomien ved anlegget. Dette kunne til dømes vere varmereservoar i form av vatn. Eit gasslager ville truleg kunne avhjelpe noko for døgnsvingingane, men lite for dei store svingingane. Bruk av biogassen til oppvarming av tappevatn, som ofte har ei meir stabil forbrukskurve, ville nok kunne avhjelpe noko. Ei variabel dosering av tilleggssubstrat, der ein doserar matavfall etter forventa temperatur i dei næraste dagane, samt forventa tal studentar på internat, vil også kunne hjelpe mykje.

Anlegget ved Tomb er i dag eit godt fungerande biogassanlegg. Det har framleis rom for forbetringar, men mykje godt har hendt sidan det vart bygd. Det er i det heile eit svært stort gode at anlegget vart bygd. Tomb VGS, Innovasjon Norge, Biowaz og Greengas, med fleire, skal ha honnør for det som har vorte gjort for gardsbiogass i Noreg. På sikt vil truleg gardsbiogass vere ei viktig kjelde til fornybar energi, samstundes som det også er eit godt klimatiltak. Kunnskap som igjen kan føre til god praksis vert best tileigna der det skjer. Slike anlegg, som Tomb representerer, er svært viktige byggjesteinar i det grunnlaget må til før gardsbiogass vert utbreidd i Noreg.

## Referansar

- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E., & Thurston, R. V. (1975). Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effect of pH and Temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 32(12), 2379-2383. doi: 10.1139/f75-274
- Fjørtoft, K., Morken, J., Hanssen, J. F., & Briseid, T. (2014). Methane production and energy evaluation of a farm scaled biogas plant in cold climate area. *Bioresource Technology*, 169(0), 72-79. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.077>
- Gjetmundsen, M. (2013). *Optimalisering av blanding mellom kugjødsel og matavfall for maksimering av biogassproduksjon*. (Master), Norwegian University of Life Sciences. Retrieved from [http://www.nb.no/idtjeneste/URN:NBN:no-bibsys\\_brage\\_45046](http://www.nb.no/idtjeneste/URN:NBN:no-bibsys_brage_45046)

<http://kart.gulesider.no>. Bilde frå biogassanlegget på Tomb

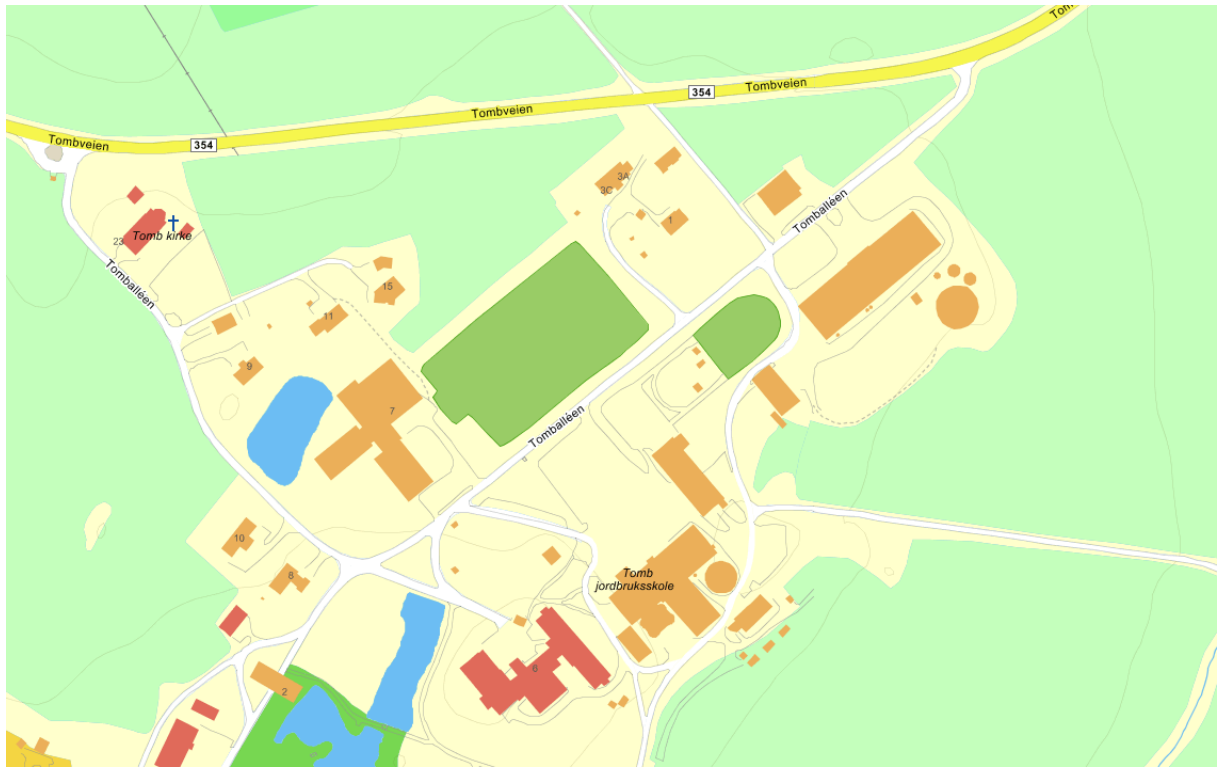
## Vedlegg:

Lenke til info om anlegget på Tomb:

[http://www.tomb.no/index.php?kat\\_id=141&art\\_id=1294](http://www.tomb.no/index.php?kat_id=141&art_id=1294)

Oversikt over kva dagar som er tekne med i dei ulike periodane:

Periode	Frå og med:	Til og med:
1	7/10-12	21/10-12
2	26/10-12	6/11-12
3	9/11-12	19/11-12
4	22/11-12	5/12-12
5	8/12-12	24/12-12
6	5/1-12	9/1-13
7	12/1-13	23/1-13
8	6/2-13	20/2-13
9	28/2-13	21/3-13
10	23/3-13	12/4-13
11	10/5-13	21/5-13
12	25/5-13	22/6-13
13	1/7-13	11/7-13
14	31/7-13	21/8-13
15	28/8-13	1/9-13
16	6/9-13	17/9-13
17	20/9-13	10/10-13
18	18/10-13	30/10-13
19	31/10-13	7/11-13
20	11/11-13	20/11-13
21	28/11-13	11/12-13



Kjelde: <http://kart.gulesider.no>

Periode	Organisk belastning (OLR)	kWh/kg VS
1	3,24	2,14
2	3,18	2,47
3	3,28	2,73
4	3,34	2,82
5	3,17	2,46
6	3,28	2,40
7	3,36	2,46
8	3,48	2,84
9	3,43	2,59
10	3,47	2,62
11	2,93	1,82
12	2,85	1,56
13	2,76	1,52
14	1,87	1,58
15	2,05	1,52
16	2,06	2,10
17	3,07	1,66
18	3,43	2,13
19	3,40	2,37
20	3,52	2,50
21	3,42	2,60