

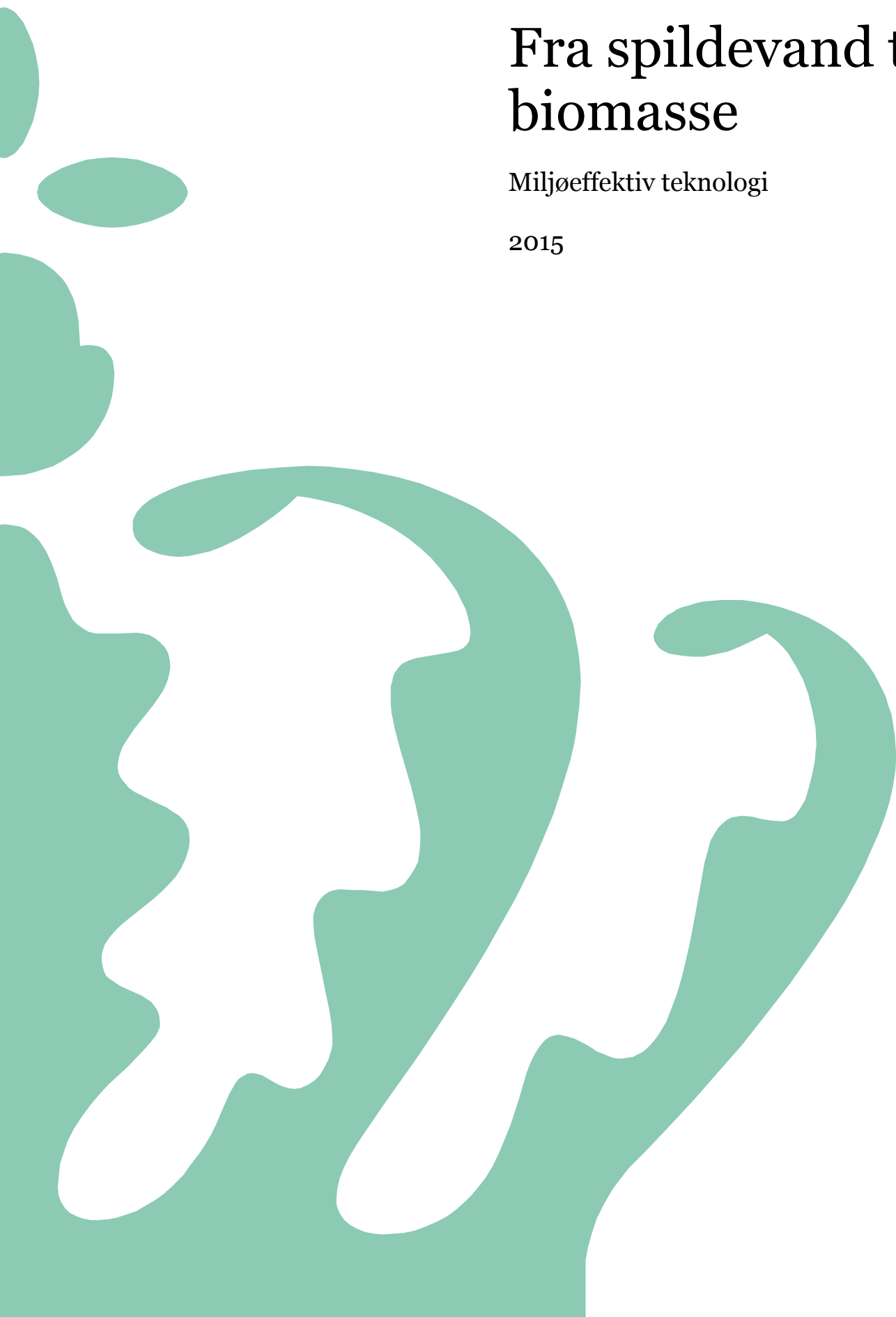


Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Fra spildevand til biomasse

Miljøeffektiv teknologi

2015



Titel:

Fra spildevand til biomasse
Miljøeffektiv teknologi 2015

Projektgruppe:

Interaktivt MedieCenter
Bsbiosystems
Veje Engineering

Udgiver:

Naturstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø
www.nst.dk

Redaktion:

Bent Mortensen
Bent Bennedsen
Peter Agertoft

ISBN nr.

978-87-92256-32-4

Ansvarsfraskrivelse:

Naturstyrelsen offentliggør rapporter inden for vandteknologi, medfinansieret af Miljøministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Naturstyrelsen finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Naturstyrelsen deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord.....	4
Sammenfatning.....	5
Summary.....	7
1. Indledning	10
2. Indhold	11
3. Udnyttelse af resultater	28
Litteratur	31
Bilag.....	32

Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet ”Fra spildevand til biomasse – Miljøeffektiv teknologi”, der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriet, 2015

Projektgruppen har bestået af:

Interaktivt Mediecenter

Bsbiosystems

Veje Engineering

I følgegruppen har, udover projektgruppen, også deltaget:

Naturstyrelsen v/Peter Jessen

Henrik Kofoed Nielsen, Institutt for ingeniørvitenskap, Universitetet i Agder

Sammenfatning

Processens effektivitet

Projektet har opnået en virkningsgrad i omsætteligheden af næringsstoffer i afgasset gylle til andemad på 72%. Virkningsgraden er fastsat i forhold den teoretiske mulighed, der er beregnet og defineret i den beregningsmodel som projektet udviklede i projektets startfase.

I et bassin med en diameter på 17 m reducerede processen næringsindholdet fra ca. 1 ton gylle pr. uge og høstede 200 kg afdryppet andemad pr. uge.

Bassinudformning og funktionalitet

På baggrund af en række forsøg har projektet anbefalet et rundt bassin, med en gyllestand på 20-25 cm, og en sidehøjde på 60 cm. Gyllen cirkuleres med en pumpe. Iltning af gyllen er essentielt for processen, og vi anbefaler at denne iltning foretages med en fontæne, der skaber en strømsluse i mødet med den roterende gylle, hvorved andemaden føres mod bassinets side, hvor det kan høstes.

Projektet anbefaler at høsten foregår med et siliconebaseret transportbånd, der fører andemaden ud af bassinet, hvor en gummiskraber frigør andemaden fra båndet til videre bearbejdning.

Projektet viste at afgasset gylle i praksis er en substans, der dels indeholder gylle og dels indeholder rester fra andre kilder, der ligeledes kan anvendes i biogasproduktion. Indholdet af substansen er derfor variabel. Det medfører, at der er behov for filtrering af gyllen før den føres ind i bassinet.

I projektet opnåede vi en rimelig drift sikkerhed med et bundfaldsfilter, hvor fremmedlegemer faldt til bunds i en buffertank før den blev pumpet over i bassinet. Gyllen bør altid pumpes fra toppen for at undgå at fremmedlegemer blokerer pumpen.

Filter funktionen skal overvejes nøje, da den kommercielle udnyttelse af den dyrkede andemad vil være afhængig af at andemaden er vokset i et bassin, hvor den kemiske sammensætning og floraen af bakterier og vira kan dokumenteres.

Ved normal drift vil der ikke være behov for at fjerne væske fra bassinet, idet den almindelige fordampning vil tendere til at være større end behovet for tilførsel af gylle. Bassinets udformning tager højde for overløb p.g.a. voldsom regnskyl.

Derimod bør der være mulighed for påfyldning af vand m.h.b på at sikre et tilstrækkeligt væskenniveau.

P.g.a. ovenstående anbefaler vi, at processen sker som batch proces. Vi anbefaler ligeledes at batchprocessen optimeres således, at den varer længst mulig tid. Det gør vi dels fordi opformering af andemad kan tage 3-4 uger, og dels med henblik på at reducere vedligeholdelsesressourcer fra producenten. Processens længde i det udviklede anlæg er afhængig af kvaliteten af det anvendte filter. Vi har en begrundet formodning om at processen kan holdes i gang i op mod 6 mdr. før bassinet skal renses.

Driftsperiode

Projektet har i flere forskellige bassiner forsøgt at vedligeholde processen i alle 4 årstider.

I vinterhalvåret er der blevet tilført lys og varme.

Det er kun lykkedes os at holde liv i processen ved temperaturer over 5 grader celcius.

Dette svarer til data fra vores beregningsmodel. Gennem projektets levetid, har vi fået større viden og erfaring med forholdene omkring andemads vækst. Ikke mindst forholdene omkring iltning.

Ved projektets afslutning er vi således ikke helt klar over om en korrekt iltning af andemaden gennem vintermånederne ville have muliggjort drift i denne periode. Eller om andemaden har behov for hvileperioder. Under alle omstændigheder vil tilførsel af varme og lys formentlig ikke være rentabelt med mindre varmen er et naturligt billigt restprodukt fra biogasproduktionen.

I et laboratorieforsøg dyrkedes andemad over en periode på 8 måneder i en beholder på 25 x 35 cm, ved stuetemperatur og udelukkende ved tilførsel af kunstlys.

Styring

Gennem hele projektet har vi arbejdet med at reducere styringsbehovet til det mindst mulige.

Dels p.g.a. etablerings- og vedligeholdelsesudgifterne, dels p.g.a. fejlmulighederne og dels fordi vi gerne vil have en så intelligent forståelse af processerne som muligt, med muligheder for enkle løsninger.

Til styring af processen har vi behov for automatisering af:

1. Tilførsel af gylle
2. Tilførsel af vand
3. Tilbagepumpning af væske ved overløb
4. Start og stop af høstaggregat
5. Pumpe til rotering af gyllesubstansen

De sensorer der anvendes til denne automatisering er:

1. Ledningsevнемåler
2. Væskestandsmåler

I praksis er ledningsevnen i den koncentrerede gylle på mellem 1,6 og 24 mS.

I projektet havde vi den bedste vækst af andemad i ved optynding med vand til intervallet: 0,7 til 2,5 mS.

Høstaggregatet blev i projektet styret af en enkel timerfunktion i styresystemets controller.

Til monitorering og styring af processerne udvalgte projektet controlleren

BACnet TCP/IP, LONWORKS®

Vi programmerede controlleren således, at alle processer kunne monitoreres og alle parametre kunne ændres. Vi udviklede ligeledes et HTML interface således, at controlleren kunne styres over internettet.

Internetacces foregik via en trådløs router med GSM interface.

Projektet foretrækker tilførsel af EL fra fastnettet.

I tilfælde af at fastnet ikke er muligt, har vi udviklet et forsyningskoncept bestående af:

1. Vindmølle, Dacon Windpower 300W
2. 150 ah batteri
3. 12 – 230 volt inverter
4. 12 timers drift baseret på tænd/sluk ur

Anvendelighed

Med det udviklede testanlæg har projektet vist, at vi på trods af den beskedne størrelse på 17 m i diameter, kan fjerne næringsstoffer i gylle svarende til 50% af produktionen hos op til 13% af svineproducenterne (de mindste producenter). Dækningsbidraget pr. slagtesvin for disse 507 producenter ud af 3860 svineproducenter er på 8 kr. Vi har estimeret at proteinværdien af det dyrkede andemad for denne målgruppe er på mellem 10 og 20 kr. pr. slagtesvin.

Disse producenter har typisk ikke biogasanlæg.

Gyllen skal derfor forbehandles i en anaerob tank, som en del af anlægget.

Anlægget kan forholdsvis enkelt opskaleres med forbedret rentabilitet. Anlægget er dog uegnet i forhold til store producenter, fordi arealet af bassinet bliver urealistisk stort.

Vi vurderer forsigtigt, at anlægget gennem 6 måneder vil producere mellem 2.6 og 5.2 ton andemad.

Vi forventer ligeledes, at et anlæg som det testede vil kunne opstilles, klar til drift for ca. 100.000 kr.

Med en forrentningstid på mellem 14 og 26 år.

Summary

Efficiency of the process

The project has achieved 72% efficiency in converting nutrients in slurry from biogas plants to duckweed. The efficiency is based on the theoretical maximum, as calculated by a mathematical model, developed at the start of the project.

A pilot plant consisting of a basin, 17 m in diameter, produced 200 kg of duckweed (wet basis) per week while consuming nutrients from approximately one ton of pig slurry.

Processing plant design

Based on the experience gathered during the project, the recommended design is a circular basin with a total depth of at least 60 cm and a depth of the growing medium (efflux from biogas plant) of 40 to 50 cm. Oxidation of the medium is essential for the process, and this can be combined with the harvesting operation in the following way: The water-biogas efflux medium is circulated using a pump. Another pump generates a fountain, which interferes with the rotating duckweed causing it to be directed towards the sides of the basin, to a point where the harvesting equipment is located. Harvesting is done using a silicone-based conveyer belt that skims the duckweed of the surface and transports it out of the basin. At the end of the conveyer the duckweed is separated from the belt by a scraper.

The efflux from a biogas plant proved to contain other thing than fermented pig slurry. This is due to the fact that farmers supplement the slurry with a variety of fermentable biological waste. Therefore the viscosity and content of solid materials is variable. This calls for a filtration of the fermented slurry, before it enters the duckweed basin. The project achieved reasonable results using a sedimentation tank, where solid objects were allowed to sediment, and slurry was pumped from the upper layers.

Depending on the use of the produced duckweed, e.g. as fodder or as raw material for food related products, close attention must be paid to the type of filtration and pre processing with a view to control the content of potential pathogens.

The water level seemed to remain fairly constant under normal circumstances, hence eliminating the need for removing water from the basin. However, measures must be taken to prevent overflow during heavy rains. Quite contrary, evaporation proved to be an issue, making it necessary to top up with fresh water at intervals.

Consequently, the recommendation is a batch process, where the expected batch period is up to six months, depending on the quality of the input and the general control of the process. This includes a period of three to four weeks, from the start, until the optimal plant cover is reached. Obviously, a longer

Batch time

It was attempted to grow duckweed year round. During winter, artificial light was administered, and the basin was heated.

According to the mathematical model, growing duckweed is only possible at temperatures above five deg. C. However, even with light and at temperatures well above five deg. C, it proved difficult to keep the duckweed alive and growing. Later in the process, it was found that oxidation seems to be a way to keep duckweed alive. When the plants cover the surface, the theory is that the root zone is depleted of oxygen, and hence, the plants die. It is not clear, whether administering oxygen (air) to the basin would have enabled production during the winter. Under all circumstances, the production would most probably not be able to pay for the additional costs of heat and light, unless these came from some otherwise not utilised by-products.

In a laboratory experiment, duckweed was kept alive and growing over an eight month period. The plants were kept in a 25 by 35 cm plastic box, at room temperature, shielded for daylight and provided with 10 W artificial light from LEDs at 6500 K colour temperature.

Process control

Throughout the project emphasis has been on reducing the need for control. Partly in order to reduce costs, partly to reduce the risk of systems failing.

The following tasks should be automated:

1. Addition of fermented slurry
2. Addition of water
3. Recycling water in the event of overflow
4. Start and stop of harvesting equipment
5. Pump for rotating the growing substance and duckweed.

Sensors used for this automation was:

1. Conductivity sensor
2. Water level sensor

The conductivity was kept at between 1.6 and 24 mS.

The highest growth rates were achieved in the interval 0.7 to 2.5 mS.

The harvester was controlled by a timer function, programmed in the control unit.

The control unit was a BACnet TCP/IP, LONWORKS®

The control unit was programmed (HTML) so that all parameters could be monitored and adjusted by an interface via the Internet. This was enabled using a GSM router.

The preferred power source is the grid. However when this is not possible, or as backup and or supplement, a concept was developed consisting of:

1. A wind turbine, Dacon Windpower 300 W
2. A 150 ah automotive type battery
3. A 12 to 230 V inverter
4. Operation limited to 12 hours using a timer

Implementation

In spite of its limited size of 17 m diameter, the pilot plant proved capable of removing up to 50% of the nutrients in slurry from a small-scale pig farm. This means that 13% of the Danish pig producers (507 out of 3860) could potentially utilize the plant. The contribution margin for each swine is eight DKK. This is true for the small-scale farmers; larger scale farmers normally obtain higher margins. Small-scale farmer usually not, however poses a biogas plant. This means that they will have to invest in an anaerobic fermentation tank.

The plant as tested can relatively easy be scaled to a larger size. However for the large-scale producers, the area covered by the basin will be render it unrealistic.

As a conservative estimation, the plant will produce between 2.6 and 5.2 tons of duckweed during a six-month annual production period. The estimated cost of establishing a plant this size is 100,000 DKK. The repayment period will hence amount to between 14 and 26 years.

1. Indledning

Projektets baggrund

I disse år ser vi et stadigt stigende ønske om at reducere miljøbelastningen gennem udvikling af miljøteknologiske produkter, der kan danne baggrund for videnbaseret vækst i danske virksomheder. Vi har gennemført et projekt m.h.b. på at undersøge muligheden for at udvikle en proces og et eksporterbart anlæg, der kan reducere miljøbelastningen fra spildevand ved at anvende næringsstofferne til produktion af biomasse til f.eks. dyrefoder (i form af andemad).

Om proces og anlæg

Spildevand fra biogasanlæg (væskefraktionen af afgasset gylle), dambrug m.m. indeholder store mængder næringsstoffer, der kan udnyttes til produktion af biomasse.

Andemad (*Lemnaceae*) er en af de planter, der vokser hurtigt. Under gunstige omstændigheder kan planten fordoble sin masse på 2 -4 døgn (Khateeb 2010).

Planten er særdeles velegnet til at rense spildevand for næringsstoffer.

Ved at dyrke andemad i anlæg, der tilføres spildevand, kan man således producere store mængder af biomasse og samtidig rense spildevand.

Andemad er mekanisk lettere at håndtere, f.eks. i forbindelse med høst, sammenlignet med mikroalger.

Eksisterende anlæg, hvor andemad anvendes til rensning af spildevand, findes fortrinsvis i udviklingslande, hvor teknologien er primitiv og dyrkning og høst er arbejdsintensiv. I USA findes enkelte, meget store anlæg, fortrinsvis i områder med varmere klima.

Udfordringen er at udvikle anlæg der:

- kan skaleres i forhold til størrelsen af det anlæg, der skal renses spildevand fra
- har en høj grad af automatisering, således at driften kan udføres med et minimum af arbejdsindsats
- er tilpasset klimaet i det Nordeuropæiske område

Formål

Formålet med projektet er at opbygge viden, der sætter konsortiet i stand til at projekttere effektive og tidssvarende procesanlæg til rensning af spildevand kombineret med produktion af biomasse i form af andemad.

2. Indhold

Projektet havde følgende fokusområder:

1. 1.1 Opstilling af en beregningsmodel på baggrund af litteratursøgning.

Modellen blev anvendt til dimensionering af anlæg og opsætning af ideelle scenarier for vækst under forskellige temperatur- og lysforhold. Herunder optag af næringsstoffer.

Modellen blev i projektet anvendt til at vurdere og optimere anlæggets virkningsgrad.

2. 1.2 Opbygning af bassin

Projektet opbyggede og evaluerede 2 typer bassiner:

- a. Et bassin, opbygget som en "foldet" kanal i en firkantet ramme m.h.b. på vurdering af kontinuerlig tilførsel af spildevand i den ene ende af kanalen, og høst af andemad og fjernes af rensed spildevand i den anden ende
- b. Et rundt bassin med batch drift

3. 1.3 Automatisering

Projektet opbyggede et styringssystem der på baggrund af monitorering af temperatur, lys og næringsindhold kunne styre tilførsel af spildevand, samt kontrollere et høstaggregat.

4. 1.4 Sikring og optimerings af proces

Dette fokusområde havde til formål at afprøve den planlagte proces under såvel vinterforhold som i et real life scenario, samt at optimere processen i forhold til de opstillede optimale beregninger m.h.b. på at definere en virkningsgrad.

5. Efterbearbejdning af projektets resultater i forhold til brugbarheden hos potentielle producenter.

Herunder at definere målgrupper for den udviklede type anlæg.

2. 1 Udvikling af beregningsmodel

Formål

At udvikle en model der kan fungere som reference for opbygning og optimering af anlæg, samt opnået virkningsgrad af den udviklede driftsproces.

Metode

På grundlag af eksisterende litteratur om andemads biologi, samt indsamlede data om aktuelle biogasanlæg, klima m.m. opstilles en model, der kan beregne anlæggets fysiske dimensioner, den estimerede produktion af biomasse, samt mængden af næringsstof fjernet fra spildevandet. Modellen udvikles i starten af projektet og tilrettes og verificeres under test af det pilotanlæg, der opbygges i fase 2.

Resultat

Andemads biologi og vækstforhold er forholdsvis godt beskrevet i litteraturen. På det grundlag kunne der udarbejdes en model til beregning af den forventede tilvækst af andemad i forhold til lys, næringsstoffer, temperatur m.m.

Beregningsmodellen er beskrevet i detaljer i bilag (1). De parametre, der indgår er temperatur, indstråling (lys), plantedække og næringsstoffer.

Temperatur:

Temperaturen angives at være den mest kritiske vækstfaktor. Selv om andemad kan overleve temperaturer under 0°C, vokser planterne først ved temperaturer omkring 5°C med et optimum mellem 25 og 35°C.

Temperaturer over ca. 35°C nedsætter væksthastigheden

Lys:

Som alle planter kræver andemad lys. Xu et al. (2012) anvendte 40 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, medens Lasfara et al.(2007) angiver at lysmætningen for *Lemna minor* er 342 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Fotoperioden, antal timer med lys, angives af de citerede forfattere til mellem 12 og 14 timer pr. dag.

Plantedække:

Mængden af planter pr. m^2 har betydning for væksthastigheden, idet få planter naturligvis giver lav vækstrate, da planterne formerer sig vegetativt. Til gengæld hæmmes væksten når plantetætheden bliver for stor, således at der opstår flere lag, hvorved de øverste skygger for de underliggende lag. Lasfara et al.(2007) angiver 103 g tørvægt pr. m^2 (1.716 v på våd basis) som plantetæthed ved start, og 176 g tørvægt pr. m^2 (2.933 g på våd basis) som det maksimale plantedække.

Næringsstoffer:

Andemad er meget tolerant overfor varierende mængder af næringsstoffer.

For N og P's vedkommende kan der opnås en optimal vækst ved koncentrationer fra lidt under 10 til lidt over 30 mg N/l, medens planterne kan klare op til ca. 330 mg N/l uden alvorlig nedgang i vækstraten.

De tilsvarende tal for P er 2 – 10 mg P/l og en inhiberende koncentration omkring 55 mg P/l.

Der blev udarbejdet et Excel-program til beregning af den forventede tilvækst, baseret på input af værdier for de anførte parametre.

Se desuden bilag 1

2.2 Opbygning af anlæg

Formål

Formålet med denne del af projektet var at designe og evaluere 2 forskellige typer af bassiner med henblik på:

1. Kontinuerlig drift versus batchdrift
2. Mulighed for vækst og høst af andemad samt vedligeholdelse
3. Behov for monitorering og automatiseret styring af ventiler til påfyldning af afgasset gylle, tilførsel af vand, samt håndtering af for megen væske
4. Udgift ved etablering

Metode

Projektet designede et pilotanlæg som specificeret i 1.1 beregningsmodel.

Formålet var at afprøve forsøgsopstillinger i mindre målestok.

Pilotanlægget blev udført i metalplader, der blev svejset sammen og efterbehandlet med vådrumsprimer.

(bilag 2 – Amigo)

Til vinterdrift blev Bassinet isoleret med 100 mm polystyrenplader og overdækket med klart lysgennemtrængeligt plast. Der blev tilført varme og kunstigt lys. (bilag 2 – Veje Engineering)

Pilotanlægget blev opstillet hos projektpartneren Amigo, Industrivej 3, 4340 Tølløse og efterfølgende hos Veje Engineering, Vintapperbuen 4, 4070 Kirke Hyllinge.

En placering af pilotanlægget hos projektpartnerne Amigo og Veje muliggjorde en lang række forsøg med få ressourcer.

Anlægget blev påfyldt afgasset gylle det blev transporteret fra Lynggården i Præstø, der var den svineproducent som projektet samarbejdede med.

Pilotanlægget gav muligheder for at vurdere flg. forhold:

1. Evaluering af kontinuerlig drift versus batchdrift
2. Principper og udstyr til høst i et firkantet, kanalsepareret bassin
3. Behov for regulering af påfyldning samt væskereduktion
4. Behov for monitorering og automatiseret styring af ventiler til påfyldning af afgasset gylle, tilførsel af vand, samt håndtering af for megen væske
5. Udgifter ved etablering

Med udgangspunkt i erfaringerne fra pilotanlægget designede projektet et testanlæg.

Anlægget blev dimensioneret således, at det på baggrund af den udviklede beregnings model ville kunne reducere næringsstofferne i den totale mængde afgassede gylle med 50% fra et mindre gårdanlæg.

En sådan reduktion blev fastsat til en virkningsgrad på 100%, og det var projektets formål at undersøge hvilken virkningsgrad vi i praksis kunne opnå i en virkelig installation under danske forhold.

Testanlægget blev udført i betonelementer, der blev opført i en cirkel med 17 m i diameter og 60 cm. højde. Bassinet blev foret med bassindug. Da andemad udelukkende gror i overfladen med max 7 cm. rødder, blev gylleniveauet fastsat til 15-17 cm. Testanlægget blev opstillet hos Lynggården, Over Lyngen 4, 4720 Præstø. Lynggården blev valgt fordi den er en af Sjællands største producenter af svin, og fordi den har en omfattende produktion af biogas, hvilket muliggjorde en virkelighedstro vurdering af processen.

(bilag 2 – Testbassin Lynggården opbygning)

Resultat

1. Kontinuerlig drift versus batchdrift

Ved projektets start, havde projektgruppen en forestilling om at kontinuerlig drift ville give det bedste produktions flow, med den største mulighed for at minimere svineproducentens arbejdskraft ved at automatisere processen.

Vi designede derfor en foldet kanal som specificeret i 1.1 beregningsmodel. Det basale princip er at afgasset gylle løbende bliver tilført i kanalens ene ende. I kanalen vokser der andemad, der optager næringsstoffer fra gyllen. Ved kanalens anden ende vil gyllen have en reduceret mængde næringsstoffer, hvorefter den 'renere' gylle kan fjernes fra bassinet og spredes på markerne. Sensorer i begge ender kan styre påfyldning af mere gylle for at hæve niveauet af næringsstoffer. Ligesom de kan anvendes til at vurdere, hvornår næringsstofferne er reduceret til et niveau, hvor væsken kan fjernes fra bassinet.

Sensorer vil ligeledes kunne vurdere hvornår tætheden af andemaden medfører at en del af andemaden skal høstes.

De indledende forsøg, med det kanalopbyggede pilotanlæg viste at vore forestillinger var forkerte på flere punkter.

- a. Ved tilførsel af gylle fordeler væsken sig i hele bassinet indenfor meget kort tid.

I pilotbassinet var niveauet af næringssalte således ens i hele bassinet indenfor 5 minutter. I det større testanlæg var niveauet det samme i hele bassinet indenfor ca. 2 timer. 'Samlebånds' tanken med en løbende reduktion af næringssalte' hen ad samlebåndet', holder derfor ikke, og kan derfor heller ikke anvendes som argument for en kontinuerlig proces.

- b. Vore forestillinger vedrørende løbende tømning af gylle med et reduceret indhold af næringssalte, var ligeledes forkerte.

I begge bassiner svarede fordampningen af væsken til den mængde gylle, der skulle tilføres for at opretholde niveauet af næringssalte til andemadsproduktionen. Det medførte, at vi kun i 1 tilfælde (ved det mindre pilotanlæg) var nødsaget til reducere væskemængden i forbindelse med voldsomme regnskyl.

Testbassinet blev derfor dimensioneret således, at dette ikke ville komme på tale (45 cm fra gylleoverflade til bassinkant).

I projektet har vi i flere tilfælde haft behov for at tilføre vand for at opretholde væskenniveauet. Indledningsvis m.h.b. på at fortynde den koncentrerende gylle til en brugbar driftskoncentration, og efterfølgende for at sikre et minimums væskenniveau. Det er derfor vores opfattelse, at en større væskedybde i bassinet ville kunne reducere, eller måske helt fjerne, behovet for løbende efterfyldning af væske. Vore erfaringer understøtter således, også i denne henseende batchdrift frem for kontinuerlig drift.

Indledningsvis lyder det måske godt med et sådant 'evighedskar', der fjerner gylle uden at det kommer noget restprodukt andet end andemad. Men konsekvensen af inddampning af gyllen, hvis indhold af næringssalte tilsvarende reduceres ved optag i andemad, er jo at de stoffer, der ikke optages af andemaden op-koncentreres i bassinet. Vi har gennem projektets levetid løbende haft fokus på dette problem, og til tider haft op-koncentreringen mistænkt for at være årsag til misvækst hos andemaden, men vi har ikke kunnet verificere dette gennem målinger. Batchkørsel giver jo et praktisk problem med at materiale fra f.eks. slam, fremmedlegemer i gyllen, cigaretskod fra gårdens medarbejdere, fremmedlegemer der tilføres fra blæst og fugle m.m., skal fjernes og bassinet renses. Over en driftsperiode på 4 måneder måtte vi 1 gang tømme og rense bassinet for metal 'skærver'; opklippet metalplade, der blev tilført via 'gyllen' fra biogasanlægget, der hos producenterne fungerer som selvstændige produktionsenheder, med tilførsel af materiale fra mange andre steder end svinestalde. (bilag 2 – Fremmedlegemer i gyllen; Et kig ned i gylletanken)

Over en 4 måneders driftsperiode oplevede vi dog ikke nævneværdig slam o. lign.

c. Andemadens vækst.

Ved tilførsel af andemad, kunne vi registrere en tiltagende kraftig vækst efter 2 uger. Denne vækst fortsatte i ca. 4 uger til et niveau, hvor der kunne høstes. Derefter skulle der tilføres ilt for at væksten kunne fortsætte (se yderligere under 1.4 optimering af proces). Ved batchkørsel må man derfor forudse ca. 4 ugers opkøring af anlægget ved hvert batchskifte, før andemadsproduktionen er på et driftsniveau.

Vore erfaringer peger således på, at selve *andemads* produktionen foregår bedst ved kontinuerlig drift. Vi har derfor 3 anbefalinger:

1. Tilstræb færrest mulige batchskift i drift sæsonen.
2. Efter vores opfattelse vil et filter før påfyldning af gylle være nødvendigt
3. Placer et net over bassinet

Disse tiltag vil i de fleste tilfælde kunne sikre drift i 6 til 9 måneder, hvilket i praksis er hele sæsonen.

2. Principper og udstyr til høst i et firkantet, kanalsepareret bassin

Ved projektets start, havde projektgruppen en forestilling om at en foldet kanal, løbende ville føre andemaden mod kanalens ende, hvor et høst aggregat ville fjerne overskydende andemad fra kanalen til viderebearbejdning.

Høstmetoder

Til det formål evaluerede vi 3 forskellige høstmetoder i det mindre pilotanlæg.

1. En skraber, der skummer andemaden ud over kanalens kant
2. En si, der i form af et trådnat løfter andemaden ud af kanalen
3. Et transportbånd der opsamler andemad og fører det over kanalens kant, hvor det passerer en skraber der fjerner det fra transportbåndet til videre bearbejdning.

På baggrund af vore forsøg vurderede vi at transportbåndet er den bedste løsning.

Det gjorde vi af følgende årsager:

1. Transportbåndet kan enkelt varieres i længde og position i forhold til bassin og efterbearbejdning i forhold til de 2 andre løsninger.
2. Transportbåndet kan give en mere præcis styring af høsten i forhold til de 2 andre løsninger, da båndets vandring fra controllerstyring til stop er på max 1 cm.

På den baggrund byggede projektet et høstaggregat der baserer sig på følgende princip:

Et silicone transportbånd 'fanger' andemaden i væskens overflade og transporterer den ud over bassinkanten. Her passerer den en gummiskraber der frigør andemaden fra silicone båndet, hvorefter den kan viderebearbejdes fra beholder eller transportbånd.

Vi har eksperimenteret med vinklen på dette transportbånd for at opnå et optimalt optag af andemad og mulighed for opsamling. Denne løsning har vist sig fuldt funktionsdygtigt.

I et rundt bassin kræver både transportbåndet og sien, at andemaden føres hen til høstaggregatet. Skraberløsningen i runde bassiner stiller ikke dette krav. Skraberløsninger anvendes ikke sjældent i rensningsanlæg, hvor en midtercentret motor, roterer en skraberarm, der skubber andemaden ud i en kanal i bassinet. Dette kræver en rende uden på bassinet, der efterfølgende tømmes hele vejen rundt, eller spules for opsamling og rensning af andemad, hvilket stiller yderligere krav til manuelle eller fordyrende automatiske processer.

Vi har derfor fastholdt løsningen, der er baseret på et transportbånd. Den har vist sig fuldt funktionsdygtigt i det runde bassin.

I stedet for at rotere en skrabe arm, har vi i stedet valgt at rotere væsken.

Rotering af væsken i bassinet med en pumpe, presser ved hjælp af centrifugal kraften, andemaden ud mod bassinets sider, hvor den høstes.

Vi fastholdt dette princip af flere årsager:

- Dels fordi det sikrer en jævn fordeling af andemaden i hele bassinet, idet vindens sammenpresning af andemaden modvirkes
- Dels fordi der er billigst at etablere
- Dels fordi det er lettere at servicere, da alt service kan foregå fra bassinkanten. Derudover giver det større mulighed for at høste og efterbearbejde andemaden ét sted.

For at optimere høsten på det valgte sted, ønskede vi at overskuds andemaden skulle opkoncentreres på høststedet. Derfor designede vi en sluse langs kanten, hvor andemaden i den roterende væske ville blive 'fanget'. For enden af denne sluse blev transportbåndet placeret.

Styring af høstaggregat

For at opretholde en optimal vækst af andemad, er det vigtigt at der sker en løbende udtynding af planterne. Derfor har projektet haft et særligt fokus på metoder der kan anvendes til at vurdere *hvornår* høstaggregatet skal påbegynde høst, og hvor meget der skal fjernes.

Til dette formål har projektet evalueret følgende principper:

1. Tryksensorer
2. Softsensorer
3. Billedanalyse
4. Strømfælde med timerdrift

1. Tryksensorer

Dette princip var baseret på kontinuerlig drift i en kanal. En nærmere undersøgelse viste, at i selv meget smalle kanaler var vindpåvirkningen af større betydning for det akkumulerede tryk end mængden af andemaden. Ved overgangen til et rundt testbassin var det oplagt at tryksensorer ikke kunne anvendes, da selv mild vind opkoncentrerer andemaden. Koncentrationen er således ikke et udtryk for mængden af andemad, men af vindens styrke.

2. Softsensorer

På baggrund af den udviklede beregningsmodel, er vi i stand til at forudse hvornår andemaden er vokset til et niveau, hvor der er behov for høst. En reduktion af virkningsgraden kan indarbejdes i softsensorens algoritme. I projektets levetid har vi dog oplevet meget store udsving i andemadens vækst. Udsving der dels skyldes lys og temperatur, men også udfordringer med at optimere vækstvilkårene for planterne i bassinet. Derfor er høsten i projektets levetid ikke blevet baseret på en softsensor, men vi ser frem til at den valgte timer løsning bliver mere intelligent ved at blive baseret på en sådan softsensor.

3. Billedanalyse

Projektet har arbejdet med muligheden for at specificere høsten på baggrund af billedanalyse. Til det formål har vi evalueret en række udendørs kameraer for kvalitet/ydelse. Med henblik på korrekt farvevurdering valgte vi Trendnet TV-IP343PI, der ligeledes kan anvendes til videobaseret overvågning af anlægget via internettet. Vi har ligeledes arbejdet med vurdering af billederne, og har haft den udfordring at kraftig vækst af alger i reflekterende lys kan være svær at adskille fra andemad. Vi har ikke valgt denne løsning, men mener at såvel billedanalyse som en softsensor vil forbedre den valgte timerbaserede løsning. Vi er dog ikke sikre på at anvendelse af billedteknologi vil give et øget udbytte, der gør en sådan anvendelse rentabel.

4. Strømfælde med timerdrift

I det etablerede testbassin roteres væsken ved hjælp af en pumpe, således at andemaden fordeles i bassinet og føres ud mod kanten. Vi undersøgte forskellige konsekvenser af

pumpens placering. Jo kraftige pumpen arbejdede desto hurtigere roterede andemaden og desto mere pressedes andemaden mod bassinets kant. Hvis pumpen rettedes mod cirkelens yderkant, så roteredes væske og andemad på en sådan måde at andemaden fordeltes jævnt og således, at den ikke blev presset mod bassinets væg. Der etableredes en overvægt af andemad ca. 1 meter fra bassinets kant. Disse forsøg blev gennemført med henblik på at optimere en fysisk sluse og en god position til at lave en billedanalyse af andemaden. Parallelt med dette arbejde har vi i projektet arbejdet med forskellige metoder til iltning af gyllen, herunder væskestråler og iltningssplader.

Ved et tilfælde berigede disse forsøg hinanden, idet vi oplevede følgende:

En væskestråle der ilter gyllen, og som stråler fra kanten og mod midten (1-2 meter fra kanten) bremser den roterende gylle en meter fra kanten, hvorved der dannes en turbulens der presser andemaden mod kanten umiddelbart efter væskestrålen. Jo mere andemad, jo mere opbremsning og turbulens. Dermed kan den koncentrerede andemad høstes ved hjælp af et transportbånd, og behovet for billedanalyse minimeres. Hvis det overhovedet er nødvendigt. Båndet kan styres ved hjælp af en simpel timer, idet andemaden ikke opkoncentreres på dette sted, hvis der ikke er en tilstrækkelig mængde. Dermed ikke sagt at en softsensor og billedanalyse ikke kan give en mere præcis høst, men det må være op til yderligere forsøg at vurdere om den merværdi, der kan opnås kan retfærdiggøre den øgede investering.

3. Behov for regulering af påfyldning samt væskereduktion

a. Påfyldning af gylle

Projektet evaluerede 2 metoder til påfyldning af gylle:

1. Den afgassede substans pumpes op i en beholder der virker som buffer for væsketilførslen. En elektrisk styret ventil placeret i bunden af beholderen åbner og lukker for tilførslen af væske, der løber ud i bassinet ved hjælp af tyngdekraften. Vore test viste, at denne metode er meget følsom overfor faststof i substansen, der i mange tilfælde rummede materiale fra meget andet end gylle (korn, metal, rester fra levnedsmiddel industri etc.). I praksis ville et filter før beholderen, således at tilstopning undgås, medføre løbende monitorering og rensning/udskiftning af filtre og dermed kræve ekstra arbejdsprocesser af svineproducenten.
2. Den afgassede substans pumpes op i en beholder der virker som buffer for væsketilførslen. En elektrisk styret dykpumpe, der flyder på substansens overflade, pumper substansen ud i bassinet. Ved en moderat mængde af faststof og fremmedlegemer fungerede beholderen, via bundfald, hermed som et forfilter. Vores monitorering viste, at beholderen skulle renses ca. hver 14 dag. Substansens sammensætning er ukontrollabel. Vi forsøgte med billige dykpumper, der brød sammen, hvorimod professionelle dykpumper med eget beskyttelsesfilter udviste en høj driftssikkerhed.

- #### **b. Der var løbende behov for additional tilførsel af væske som supplement til 'gylle substansen'.**
- Dette skete ved at tilføre almindeligt (gen)-brugsvand fra svineproducenten. Tilførslen kan ukompliceret styres ved hjælp af en væskenniveaumåler og en elektrisk ventil. Som det fremgår af '1. Kontinuerlig drift versus batchdrift', så gav processen ikke anledning til at vi skulle fjerne væske fra bassinet i den almindelige drift. Vi har i dette afsnit foreslået en dimensionering af bassinet der reducerer (eller helt fjerner) behovet for reduktion af væske ved kraftige regnskyl og lav fordampning. I projektperioden har vi etableret en overløbssikring der på baggrund af en væskenniveau måler pumper overskydende gyllesubstans tilbage i bufferbeholderen. Denne løsning er blevet anvendt i ét tilfælde i det mindre pilotanlæg, der ikke var dimensioneret til at store udsving i væskemængden.

4. behov for monitorering

Projektet har evalueret behovet for monitorering og styring.

I projektforløbet har vi anvendt og evalueret følgende sensorer:

- a. Kvælstofmåler
Anvendt til bestemmelse af kvælstof i gyllesubstansen
- b. Ledningsevne måler (bilag 2 – Ledningsevne måler)
Anvendt til at undersøge om en prisbillig ledningsevne måler kan være et troværdigt alternativ til den mere komplicerede måling af kvælstof. Det kunne den! Derefter anvendt til vurdering af tidspunkt for tilførsel af gyllesubstans.
- c. Temperatur målere i vand og luft
Anvendt til at sammenholde andemadens vækst i bassinerne med den udvikle beregningsmodel i alle 4 årstider. Tése: Hvis beregningsmodellen kunne verificeres gennem konkrete punktmålinger, så ville vi have sandsynliggjort at processen generelt vil forløbe som forudset i beregningsmodellen. Beregningsmodellen blev verificeret for temperaturer over 5 grader.
- d. Lysmålere
Samme formål og resultat som c.
- e. Kameraer
Anvendt til at vurdere mængden af andemad og tidspunkt for høst
- f. Væskeniveaumåler
Anvendt til at vurdere tidspunkt for tilførsel af vand og reduktion af væske
- g. Softsensorer
Anvendt til vurdering af hvorvidt ovenstående sensorer kan erstattes af softsensorer. Den valgte løsning anvender ikke softsensorer til styring af processen, da de meget varierende forhold omkring processen har krævet løbende målinger og ikke har muliggjort standardiserede algoritmer. Vi forventer dog, at et længerevarende driftsforløb vil kunne danne baggrund for udvikling af softsensorer. I dette projekt har vi implementeret enkle softsensorer (case relationer) i automatiseringsenhedens controller til at styre automatiseringen.

Disse sensorer er blevet anvendt til at evaluere muligheden for:

- a. Tilførsel af gyllesubstans
- b. Vurdering af tidspunkt for tilførsel af gyllesubstans
- c. Tilførsel af vand
- d. Vurdering af tidspunkt for tilførsel af vand
- e. Reduktion af væske
- f. Vurdering af tidspunkt for reduktion af væske
- g. Start af høstaggreat
- h. Vurdering af tidspunkt for start af høstaggreat

Det gennemførte projektarbejde er sket med henblik på at udvikle et holdbart koncept. Og en væsentlig del af monitoreringsarbejdet og forsøg med styringer er derfor sket med det formål at danne videnmæssig baggrund for at specificere en sådan enkel og driftsikker løsning. I den valgte løsning er vi lykkedes med at reducere de anvendte komponenter til:

Sensorer:

- a. Ledningsevne måler
- b. Væskeniveau måler

Disse sensorer giver input til en controller der styrer:

- a. Start/stop af cirkulationspumpe
- b. Start/stop af iltningspumpe
- c. Start/stop af pumpe til påfyldning af gyllesubstans
- d. Åben / luk af ventil til påfyldning af vand
- e. Start/stop af høstaggreat

5. Udgifter ved etablering

Ved en ny installation af et testoplæg med den valgte løsning vil udgifterne til leverandører være på 87.000 kr. excl. moms.

Hertil skal lægges indkøring og avance.

2.3 Udvikling af et automatiseret system til styring af produktionen

Formål

Denne aktivitet har 3 formål:

1. Valg af udstyr og metoder der muliggør automatisering af processen
2. At skabe mulighed for fjernmonitorering og fjernstyring af processer såvel manuelt som programmering af case- styrede automatiseringsrutiner
3. At skabe mulighed for at automatiseringssystemet kan fungere med og uden tilførsel af strøm fra fastnettet.

Metode

1. Valg af udstyr og metoder der muliggør automatisering af processen.
Aktiviteten testede og evaluerede:
 - a. BACnet (Building Automation and Control network) samt Modbus (Sneider Electric / Modbus organization).
 - b. Interfaceopsamling fra sensorer.
 - c. Styring af pumper og høstaggregat.
 - d. Mulighed for opsamling af data i en SQL database.
2. Mulighed for fjernmonitorering og fjernstyring af processer såvel manuelt som programmering af case- styrede automatiseringsrutiner

Aktiviteten testede og evaluerede:

- a. Excel web (XL1000A500).
 - b. Webinterface med implementerbare HTML sider i controlleren der muliggør direkte kontrol og ændring af parametre i en webbrowser.
 - c. Webinterface til SQL database.
 - d. Internetacces via router og gsm net.
3. Mulighed for at automatiseringssystemet kan fungere med og uden tilførsel af strøm fra fastnettet.

Det må forventes, at anlægget og dets styring i nogle tilfælde vil blive placeret langt fra adgang til fastnet. Vi ønskede derfor at evaluere om drift uden fastnet er muligt.

Aktiviteten testede og evaluerede:

- a. Drift med fastnet (230v)
- b. Drift på batteribasis over 12 – 230 v inverter
- c. Drift med vindmøller / solceller
- d. Kombineret drift

Resultat

1. Vi valgte at basere automatiseringen på BACnet TCP/IP, LONWORKS®

(bilag 2 – Ledningsevne måler; Veje Engineering, vinterdrift)

Det gjorde vi af 2 årsager:

- a. Kontrolleren understøtter umiddelbart alle de sensorer som projektets partnere havde præferencer for.
- b. Projektets underleverandører og samarbejdspartnere havde stor erfaring med denne kontroller.

Modbus viste sig funktionsdygtig, og vi har ikke belæg for at den ikke kan anvendes med samme resultat som BACnet, men den erfaring og faglig viden, der viste sig at være i projektgruppen i forbindelse med BACnet gjorde udslaget.

Den valgte kontroller har:

- Op til 500 hardware punkter.
- SMTP for email alarmer

- XFC3A06001 IO Lon modul
- 4 UI Universal indgange
- 4 DI Digitale indgange
- 2 AO Analog udgange
- 4 DO Relays

2. Den evaluerede løsning viste sig at være fuldt funktionsdygtig.

De udviklede HTML sider gav direkte kontrol over alle parametre i kontrolleren og muliggjorde såvel manuel kontrol og mulighed for at definere den automatiske styring over internettet. Datainterfacet gav mulighed for selektiv søgning på en valgfri kombination af sensorer i et valgfrit tidsinterval. Interfacet understøttede ligeledes eksport til Excel. Vi oplevede at routeren med mellemrum 'hang'. Vi kunne ikke specificere om dette skyldtes variationer i strømtilførslen, varme, kommunikationsforhold eller lignende. Vi specificerede derfor at kontrolleren skulle resette strømtilførslen til routeren en gang i døgnet. Denne nulstilling af routeren havde ingen indflydelse på den specificerede automatisering og de opsamlede data. Projektet implementerede denne fjernstyringskontrol under: www.hobit.dk/andemad Projektet arbejdede derfor med denne løsning fra gennem resten af projektet.

3. Den valgte kontroller, pumper og høstaggregat benytter 230 v.

Ved projektets start havde vi ikke forventet, at skulle bruge pumper, idet tilførsel af gyllesubstans var tænkt baseret på fri udstrømning reguleret af ventiler. Pumper til gylle tilførsel, rotation og iltning har øget strømforbruget væsentlig. Ikke mindst fordi pumper kræver en kraftig startstrøm. Vi evaluerede derfor flg. forhold:

- Drift med fastnet (230v)
Den automatiserede proces kører uproblematisk ved 230 v fastnet. Det har dog været nødvendigt at resette routeren en gang dagligt for at undgå at kommunikationen 'hang'. Denne nulstilling gælder alene routeren. Strømtilførslen til routeren bliver resat af kontrolleren.
- Projektet indskød et 12 v batteri på 150 ah mellem 230 v og strømforsyning. Batteriet blev kontinuerligt opladt af en lader og 12v spændingen blev omformet til 230 af en inverter. Dette setup virkede ligeledes upåklageligt. Hvis 230 v fastnet blev frakoblet kunne batteriet trække system inklusiv pumper i 4 dage. Vi testede hvor lang tid batteriet kunne trække systemet, hvis vi via et tænd/sluk ur reducerede systemets drifttid til 12 timer. Vi testede ligeledes hvorvidt en sådan reduceret 'opetid' havde indflydelse på reduktion af næringsstoffer og vækst af andemad. Med en opetid på 12 timer kunne systemet køre på batteridrift i ca. 7 dage. Genopladningen til fuld spænding fra tomt batteri var ca. 1 døgn.
- For at evaluere alternative lade muligheder til erstatning for fastnet indskød vi en lademåler mellem fastnet og batteri. Denne måler viste, at kravet til lade strømmen er 2.5 ampære. De solcellepaneler vi evaluerede gik fra 0,3 til 1.2 ampære under ideelle forhold, hvilket ikke er tilstrækkeligt. På den baggrund har vi i samarbejde med Lynettens Bådservice, der er specialister i den type vindmøller, valgt: Dacon Windpower 300W. Der ved en vindhastighed på 5.8 m/s (den gennemsnitlige vindhastighed i dk. Iflg. DMI) vil give mere en 4 ampære ved 12 volt.
- Kombineret drift
Vi anbefaler drift baseret på fastnet 230 volt, hvor dette er muligt. Hvis dette ikke er muligt anbefaler vi brug af den valgte vindmølle, eller lignende med samme specifikationer der lader et 12 volts batteri som det anvendte. Batteriet tilsluttes en inverter der leverer 230v. Vi anbefaler desuden 12 timers drift i dagtimerne, der samtidig resetter kommunikationen. **Bemærk at** der skal tilføres ventilation til det skab, hvori udstyret monteres, da for megen varme kan brænde dele af controller og interfaces af. Det oplevede vi!

2.4 Sikring og optimering af proces

Formål

Dette fokusområde havde til formål at afprøve den planlagte proces under såvel vinterforhold som i et real life scenario, samt at optimere processen i forhold til de opstillede optimale beregninger m.h.b. på at definere en virkningsgrad.

Metode

Arbejdet foregik i 2 perioder i forskellige bassiner

1. Det fremstillede mindre pilot bassin, blev anvendt til indledende eksperimentelle test, samt til at undersøge muligheden for vinterdrift.
Bassinet blev isoleret med 100 mm. polystyren og overdækket med klar plast.
I bassinet installerede vi 4 kW varmekabler.
Over bassinet installerede vi lysarmaturer.
Temperatur, varme, lysmængde og ledningsevne blev kontinuerligt monitoreret af sensorer der blev tilsluttet kontrolleren. Varmesensorer blev placeret flere steder i væsken og over væsken for at måle mikroklimaet omkring andemaden.
Alle processer i dette pilotbassin blev 'håndholdt' og monitoreret.
De automatiske styringsenheder blev håndteret manuelt for at følge alle forhold.
Flere parallelle processer blev igangsat i mindre kar, hvor lysdioder bl.a. blev afprøvet, og hvor N og P blev monitoreret.
2. Det fremstillede testbassin i realistisk størrelse blev opført på Lynggaarden i Præstø. Dette bassin blev designet på baggrund af resultaterne af vinterdrift med pilot bassinet og blev ikke isoleret, og fik ikke tilført varme og lys.
Temperatur, lys og ledningsevne blev fortsat monitoreret.
Gyllesubstansen blev tilført både ved direkte udpumpning fra tankvogne og med beholdere som væskebuffer og som et groft bundfældningsfilter.

Udfordringer / faktorer

Mulighed for helårsdrift ved tilførsel af lys og varme, samt valg af andemadstype

Andemad kan vokse fint under varmere himmelstrøg; men er det muligt at øge rentabiliteten af et anlæg i Danmark ved at have et anlæg i drift i vinterhalvåret? Projektet har undersøgt dette, og har ligeledes undersøgt om udgifterne til vinterdrift kan reduceres ved isolering, overdækning og kunstigt lys med forskellige bølgelængder.

- **Valg af andemad**

Der findes fire arter af andemad i Danmark:

- Liden Andemad (*Lemna minor*)
- Kors Andemad (*Lemna trisulca*)
- Tyk Andemad (*Lemna gibba*)
- Stor Andemad (*Spirodela polyrhiza*)

Kors andemad blev udelukket på forhånd, da dens vækstform er markant forskellig fra de øvrige arter og uegnet til formålet, idet den vokser delvist neddykket i væsken. Tyk andemad er sjælden i Danmark og kunne ikke findes. Der opnåedes gode resultater med både liden andemad og stor andemad, men stor andemad er at foretrække idet den har flere og korte rødder (ca. 0,5 -1,0 cm) Dette gør planterne mere "robuste" og forhindrer sammenfiltring af planterne via deres rødder. Liden andemad fungerer fint til formålet, men deres længere rødder (op til 7 – 8 cm) bevirker at

planterne let klumper sammen. Desuden er planterne mere sårbare, idet hver plante kun har en rod..

- **Isolering**

Pilotbassinet blev isoleret med 100 mm polystyren, og overdækket med lysgennemtrængeligt plast.

(bilag 2 – Pilotbassin, Veje Engineering vinter)

- **Tilførsel af varme**

Projektet installerede 4 kw varmekabler i pilotbassinet, disse kabler sikrede en temperatur omkring planterne i luft og vand på ca. 10 grader.

- **Tilførsel af kunstigt lys**

I vinterperioden blev pilotbassinet belyst med lysstofrør med farvetemperatur svarende til dagslys. Lyset var tændt i 13 timer pr. døgn. Desuden eksperimenteredes på laboratorieniveau med belysning med røde og hvide lysdioder.

- **Resultat**

Ingen vækst i andemaden under 5 grader.

Belysning med 12 stk 1 W lysdioder med en bølgelængde på 635 nm var ikke tilstrækkeligt til at sikre vækst af andemad i en beholder på 25 x 35 cm.

Hvide lysdioder (9 stk.) med en farvetemperatur på 6500 K og en effekt på 10 W gav god vækst af andemad i et bassin på 25 x 35 cm.

Andemaden dør, og vi har ikke i vinterperioden kunnet verificere, om det er fordi den har brug for hvile, eller om det er fordi vi på det tidspunkt ikke havde viden omkring specifikke ilttningsbehov.

Under alle omstændigheder vil omkostningen ved varmetilførsel gøre drift om vinteren urentabelt med mindre der er tilgængeligt overskudsvarme fra andre processer i forbindelse med biogasanlægget.

Det etablerede testanlæg blev derfor ikke isoleret og havde ikke varmelegemer og kunstigt lys.

Vækst af andemad

Projektet har gennem hele levetiden oplevet at nytillført andemad er vokset kraftigt, hvorefter det er dødt. (bilag 2 – Processen, Død andemad før iltning)

Dette problem har selvfølgelig haft en høj prioritet gennem hele projektet, da et system der kan håndtere andemad ikke er meget bevendt, hvis man ikke kan få andemaden til at gro.

Vi har derfor spurgt en lang række af eksperter om forhold, der kan have indflydelse på dette fænomen.

Disse har primært peget på flg. muligheder:

1. Rester af sprøjtemidler, herbicider, der opkoncentreres i anlægget.
2. Toxisk indhold i bassinet der yderligere opkoncentreres ved fordampning
3. En naturlig cyklus for andemad
4. Manglende ilt

- **Rester af herbicider i den afgassede gylle.**

Dette kan anses for usandsynligt, idet vækstraten af andemaden i givet fald ville være påvirket fra starten og evt. stige i takt med nedbrydningen af herbicidet. Derudover udbringer landmændene afgasset gylle på markerne for at udnytte næringsstofferne, hvilket ikke ville være tilfældet, hvis den afgassede gylle indeholdt stoffer, der kunne påvirke væksten af afgrøden i negativ retning. Ved at analysere mængden og karakteren af planter i og i omegnen af bassinerne, har vi ikke fundet denne forklaring sandsynlig.

- **Toxisk indhold i bassinet der yderligere opkoncentreres ved fordampning**

Dialog med laboratorier, herunder Eurofins, har ikke muliggjort en generel test for toxisk indhold.

Vi har derfor måttet lavet sammenlignende undersøgelser af planter i bassinerne for at vurdere i hvilket omfang de vil være i stand til at overleve i tilfælde af toksisk indhold i bassinet.

Vi har ikke fundet det sandsynligt, at andemaden dør p.g.a. toksisk indhold.

- **En naturlig cyklus for andemad**

En kontakt til tidligere (nu pensioneret) planteforsker ved KU og ekspert i andemad, Per Mølgård, gjorde os nervøse. Per Mølgård kunne fortælle, at han har gjort flere forsøg på at få andemad til at gro i bassiner; men at det ikke er lykkedes. 'Det vokser og vokser – og så går det ud eller til bunds'. Per Mølgård hælder til at det formentlig er en del af en naturlig cyklus for planten. Per har været særdeles hjælpsom med viden og litteratur på området.

- **Manglende ilt**

Ved konkrete observationer systematisk foretaget af Veje, kunne, vi i naturen, se at andemaden tilsyneladende gror godt i vandhuller med begrænset, men kontinuerlig bevægelser i vandoverfladen. Biolog og biotech specialist, Søren Vedel Nielsen, pegede på muligheden for at andemadens forbrug af ilt, kombineret med en let vegetabilsk oliefilm på overfladen kunne slå andemaden ihjel grundet iltmangel, hvorefter de ville falde til bunds og rådne. Hvorved iltmanglen ville blive endnu større. På denne baggrund etablerede vi en pumpe der iltede vandet via et 'springvand' hen over en metalplade. (bilag 2 - Processen – Montering af pumpe; Indledende iltningsforsøg) I løbet af 2 uger groede andemaden som aldrig før. Og den fortsatte med at gøre det til anlægget blev taget ned d. 31.7.2014. (bilag 2 – Processen, Efter iltning) Anlægget producerede i denne periode ca. 200 kg. andemad (afdryppet vægt) om ugen.

Anvendelsen af sensorer

Vi har ikke kunnet konstatere væsentlige forskelle i vækst af andemad og optag af næringsstoffer, der relaterer til almindeligt udsving i lys og temperaturer i perioden fra 1. april til 31.juli.

Vi har derfor haft en dialog med EU-FP7 projektet på Kalundborg rensningsanlæg (<http://www.e4water.eu/>, Per Møller). Deres erfaringer er ligeledes, at den nødvendige lysmængde er forholdsvis lille.

Anvendelsen af sensorer til løbende måling af temperatur og lys er derfor god til indkøring og diagnostik, men ikke nødvendig i den daglige drift.

Projektet har vist, at der er en holdbar sammenhæng mellem indholdet af næringsstoffer i bassinet og ledningsevnen. Det har medført, at koncentrationen af gylle i væsken med en god præcision kan styres på baggrund af en enkel ledningsmåler. Vi har i perioden opnået den største reduktion af ledningsevnen ved drift i ledningsevne intervallet 0,7 – 2,5.

Styring af gylletilførsel

Projektet har erfaret, at både indhold og konsistens af væsken fra en biogasproduktion, vidner om meget andet end gylle. Derfor har den automatiserede frempumpning af afgasset 'gylle', i praksis ikke kunnet foregå uden manuelt arbejde. Vi har ligeledes haft en dialog med e4water, Per Møller om dette problem. På den baggrund har vi fået viden om de filtre vi med fordel kan sætte før pumpen. Dels for at sikre den basale pumpefunktion, og dels for at kunne højne den kommercielle værdi af det dyrkede andemad. Implementering af disse filtre ligger dog uden for nærværende projekts indhold og budget.

Resultat

Reduktion af næringsstoffer i gyllen

Projektets målsætning var at give videnskabelig baggrund for at kunne udvikle og sælge et anlæg, der kan håndtere 50% af gyllen fra et mindre gårdbrug.

I drift perioden har vores anlæg med en diameter på 17 m, fjernet næringsstofferne i ca. 1 ton gylle pr. uge.

Ved 6 måneders drift svarer dette til gyllen fra 147 dyr (søer og smågrise), eller 74 slagtesvin (Aarhus Universitet (Normtal 2011) og Landbrugets Byggeblad). Dette modsvarer mindst 50 % af produktionen hos 507 ud af 3860 producenter. Ved projektets start estimerede vi, at et anlæg som det etablerede teoretisk ville kunne fjerne næringsstofferne fra 50% dyrene på et mindre gårdbrug som vi estimerer til at have 409 søer og smågrise eller 205 slagtesvin. Projektet skulle undersøge, hvor stor en procentdel af denne teoretiske beregning vi kunne opnå i praksis. Vi har opnået en virkningsgrad på 72%, hvilket vi er særdeles tilfredse med.

3. Udnyttelse af resultater

Dækningsbidraget pr. slagtesvin for de 507 mindste ud af 3860 svineproducenter er på 8 kr. (Produktionsøkonomi-svin). Disse producenter har op til 100 slagtesvin (Danmarks statistik, 2014). Disse producenter har typisk ikke biogasanlæg. Gyllen skal derfor forbehandles i en anaerob tank, som en del af anlægget. Med dette lille anlæg har projektet således vist, at vi kan bearbejde gyllen for 50% af produktionen hos op til 13% af producenterne. Hvilket overholder vores målsætning for anlæggets målgruppe.

Anlægget kan forholdsvis enkelt opskaleres med forbedret rentabilitet. Anlægget er dog uegnet i forhold til store producenter. Fordi arealet af bassinet bliver urealistisk stort.

Det testede anlæg producerede under optimale forhold ca. 200 kg. andemad pr. uge. Hvis anlægget drives 6 måneder i sommerhalvåret, vil dette give 5,2 ton.

Vi vurderer forsigtigt, at anlægget gennem 6 måneder vil producere mellem 2,6 og 5,2 ton andemad.

Vi forventer ligeledes at et anlæg, som det der er afprøvet i Præstø, vil kunne opstilles, klar til drift for ca. 100.000 kr.

Projektet har vurderet rentabiliteten af et sådant anlæg i forhold til 2 forskellige anvendelser af den dyrkede andemad:

1. Afbrænding af andemad i biogasanlæg

Vi kan forvente, at denne mængde andemad vil producere 549 – 1098 m³ biogas (Biomasse til biogasanlæg, Agrotech 2013). En sådan mængde biogas repræsenterer en værdi på 1375 kr. – 2750 kr. Tilbagebetalingstiden for et sådant anlæg ved afbrænding af andemad i biogasanlæg er (ex. forrentning) er således mellem 73 år og 26 år. Hertil kommer at mindre gårdbrug typisk ikke har biogasanlæg.

2. Anvendelse til svinefoder

Tørret andemad har en meget høj procentdel protein (43% *Centre for Duckweed Research & Development University of New England Armidale, NSW 2351*),

Vi har derfor undersøgt muligheden for, og rentabiliteten af, at anvende den dyrkede andemad til svinefoder. Optørring af den afdryppede andemad vil reducere vægten til 10%. Beregningsforudsætningen er derfor en tørvægt på mellem 260 kg. og 520 kg.

Den anbefalede energi fordeling angiver at proteinets andel skal være 20%. Dette medfører at andemaden kan suppleres med en tilsvarende mængde foder uden protein, for at reducere proteinindholdet fra 43% til 20%.

Med andre ord erstatter 260 - 520 kg andemad mellem ca. 520 kg og 1040 kg foder. Andemaden indeholder alle essentielle aminosyrer, men i varierende mængde, hvilket kan nødvendiggøre et kosttilskud.

Dette svarer til en værdi på mellem 3400 kr. og 6800 kr. For de mindste producenter vil dette medføre at reduktionen af udgifter til foder pr. slagtegris vil være mellem 68 kr. og 132 kr. for producenter med mellem 50-100 slagtesvin (73 producenter) og mellem 132 kr. og 680 kr. pr. slagtegris for producenter med mellem 10 og 50 slagtesvin (producent/størrelse: Danmarks statistik 2014). Der kan (og bør!) tages mange forbehold i en sådan beregning, men det er overvejende sandsynligt at de mindre producenter vil kunne opnå mere end en fordobling af deres OH pr. slagtesvin ved den reduktion i foderstof udgifter som andemaden vil medføre.

Hertil kommer at producenten kan øge sin produktion med 56 svin på samme areal = 448 kr.
Ved anvendelse af andemaden til svinefoder vil den årlige indtægt således blive på mellem 3.848 kr. og 7.228 kr.

Tilbagebetalingstiden for et sådant anlæg ved anvendelse af andemad til svinefoder (ex. forrentning) er således mellem 26 år og 14 år. Anvendelsen af andemaden til svinefoder vil kræve at gyllen bearbejdes for vira og bakterier. Dette sker i den anaerobe proces i tank, efterfulgt af opvarmning. Herved sikres at gyllen har et lavere bakterie og vira niveau end det der pt. køres ud på markerne. Ved anvendelse af gyllen udenom biogasanlæg, sandsynliggøres at gyllen 'kun' består af gylle og ikke andre afgassede materialer fra landbrugs- og fabriksproduktion.

<http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/LRRD/LRRD7/1/3.HTM>

3. Modulopbygget anlæg

Projektet har vist, at den udviklede proces kan gennemføres i et bassin bestående af standardkomponenter. Som standardkomponenter har projektet arbejdet med betonelementer fra virksomheden Starke. Ved montering af flere betonelementer kan bassinets størrelse op skaleres til en hvilken som helst størrelse. Ligeledes kan automatiserings systemet tilkoble flere sensorer med den eksisterende controller for nøjagtig måling på flere positioner. Et af projektets resultater er således et modulopbygget anlæg, der let kan op skaleres. Begrænsningen i det udviklede anlæg ligger således ikke i muligheden for at øge anlæggets volumen, men i rentabiliteten i at investere i større anlæg, set i forhold til det landbrugsareal som et større anlæg vil beslaglægge.

4. Salg og levering af anlæg

Projektets partnere vil gerne samarbejde om at sælge og levere anlæg. Projektet har vist at potentialet for anlæg i højere grad er hos små producenter frem for store. Disse små producenter har ikke biogasanlæg, og gyllen skal derfor forbehandles i anaerobe tanke. Projektets partnere har derfor besluttet at undersøge denne mulighed nærmere.

En eventuel etablering af fælles virksomhed med henblik på salg og levering af anlæg vil blive besluttet på baggrund af denne undersøgelse.

Parallelt hermed vil projektets partnere håndtere alle forespørgsler om leverancer af anlæg og konsulentbistand som et fælles konsortie der ledes af IMC.

5. Information om projektets resultater

Ved projektets start ønskede vi at informere interessenter indenfor miljø og landbrug, samt regional udvikling om projektets resultater.

Projektets resultater er faldet i 2 dele:

- a. Teknisk faglig udvikling og problemstillinger
- b. Kommerciel udnyttelse

Som det fremgår af nærværende rapport har projektet især arbejdet med håndtering af faglige problemstillinger som baggrund for at kunne opnå en kommerciel udnyttelse af konceptet.

Projektet har vist at konceptet kun delvist, og primært efter videreudvikling, vil kunne udnyttes kommercielt.

På den baggrund har projektet primært informeret interessenter der er interesseret i den faglige udvikling. Projektet har således informeret:

- a. Publikationer
 - Agrologisk
 - Effektivt Landbrug
 - Groware-Nyt
 - Jord og Viden
 - LandbrugsAvisen
 - Maskinbladet
 - Ingeniøren
- b. Forskning og udvikling
 - e4water (Novozymes, Novo Nordisk, Dong Energy, Kara/Noveren, Kalundborg Vandforsyning)
 - Eyed.com
 - Universitetet i Agder
- c. Producenter
 - Cowex a/s
- d. Brugere
 - Horsens Vandværk
 - Foreningen for danske biogasanlæg
 - Bregentved gods
- e. Regionale Vækstfora, Kommune
 - Vordingborg kommune
 - Vækstforum, Sjælland
 - Vækstforum, Hovedstaden
 - Vækstforum, Bornholm
 - Vækstforum, Syddanmark
 - Vækstforum, Midtjylland
 - Vækstforum, Nordjylland

Litteratur

Citerede referencer

Docauer, D. M. 1983. PhD Thesis Univ. Mich. Pp. 223

Iqbal, S., 1999. Duckweed aquaculture. Sandec Report no. 6/99, EAWAG 1999, 64pp.

Landolt, E. 1986. The family of *Lemnaceae* – A monographic study: Morphology, karyology, ecology, geographic distribution, systematic position, nomenclature, descriptions. In *Biosystematic Investigations in the Family of Duckweeds (Lemnaceae)*. Veroeffentlichungen des Geobotanischen Institutes der EHT, Stiftung Ruebel, Zuerich. Vol 2. No. 71: pp. 566.

Monette, F., Lasfar, S., Millette, L., Azzouz, A., 2006. Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (*Lemna minor*) growth under controlled eutrophication. *Water Res.* 40 (15), 2901–2910.

Samir Lasfara, Frederic Monettea, Louise Milletteb, Abdelkrim Azzouzc (2007) Intrinsic growth rate: A new approach to evaluate the effects of temperature, photoperiod and phosphorus–nitrogen concentrations on duckweed growth under controlled eutrophication. *Water Research* 41 (2007), P. 2333 – 2340.

Xu J., J. J. Cheng, A. M. Stomp. (2012) Nutrient removal from swine wastewater by growing duckweed: a pilot study. *Transactions of the ASABE* Vol. 55(1): 181-185 _ 2012 American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-0032.

Bilag 1

Andemad

Beregningsmodel og optimale dyrkningsforhold

Projekt "Fra spildevand til biomasse"
Miljøeffektiv teknologi - 2015

Indledning

Dette skrift er en kortfattet sammenskrivning af oplysninger indsamlet under litteraturgennemgang i forbindelse med opstilling af en beregningsmodel for vækstraten af andemad.

Oplysningerne er supplerede med henvisninger til information om fire arter af andemad, samt indsamlede oplysninger om den fysiske udformning af anlægget.

Andemad-familien (*Lemnaceae*). Efter moderne fylogenetisk forskning placeres planterne nu i [Arum-familien](#).

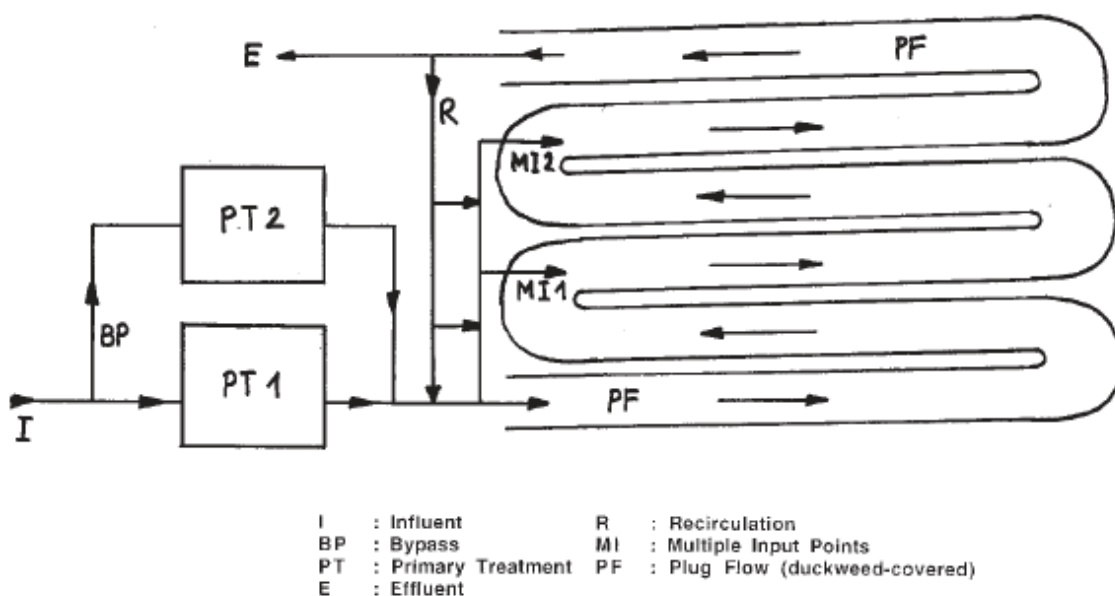
- [Liden Andemad](#) (*Lemna minor*)
- [Kors Andemad](#) (*Lemna trisulca*)
- [Tyk Andemad](#) (*Lemna gibba*)
- [Stor Andemad](#) (*Spirodela polyrhiza*)

Afhængighed af vækstfaktorer

Bassin:

Andemad kan dyrkes i et kontinuerligt system, hvor vandet strømmer gennem bassinet, eller batchvis, hvor bassinet fyldes, kulturen startes, og når næringsstofferne er udtømt, høstes andemaden og bassinet tømmes.

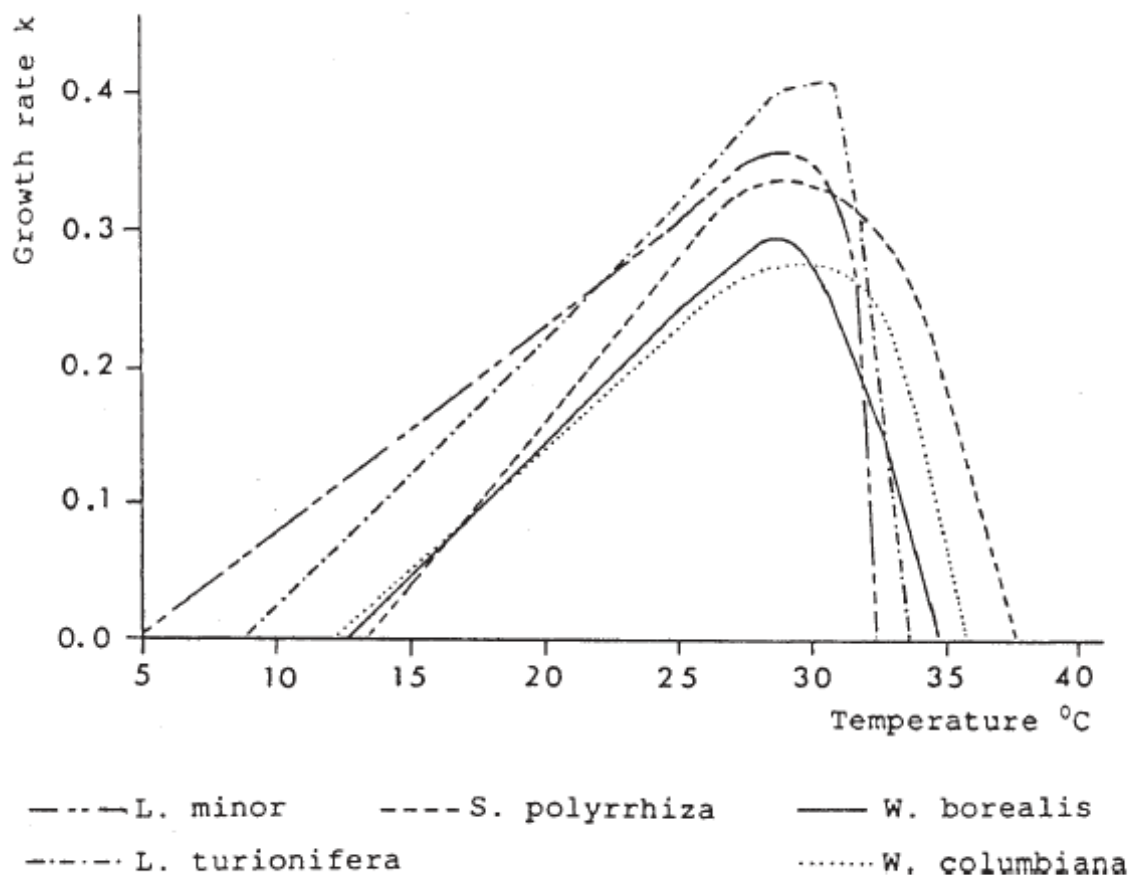
For kontinuerlige systemer angiver Iqbal (1999), baseret på to forfattere, længde/breddeforhold på 10:1 til 38:1. Dybden angives til 0,3 til 2,7 m, med 0,4 – 0,9 som anbefalet værdier.



Figur 1. Eksempel på bassinsystem til kontinuerlig produktion af andemad (efter Iqbal 1999).

Temperatur:

Temperaturen angives at være den mest kritiske vækstfaktor. Selv om andemad kan overleve temperaturer under 0°C, vokser planterne først ved temperaturer omkring 5°C med et optimum mellem 25 og 35°C. Temperaturer over ca. 35°C nedsætter væksthastigheden (figur 2).



Figur 2. Vækstrate for forskellige arter af andemad som funktion af temperaturen. (Efter Docauer 1993, I Landolt, E. 1886)

Lys:

Som alle planter kræver andemad lys. Xu et al. (2012) anvendte $40 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, medens Lasfara et al. (2007) angiver at lysmætningen for *Lemna minor* er $342 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Fotoperioden, antal timer med lys, angives af de citerede forfattere til mellem 12 og 14 timer pr. dag.

Plantedække:

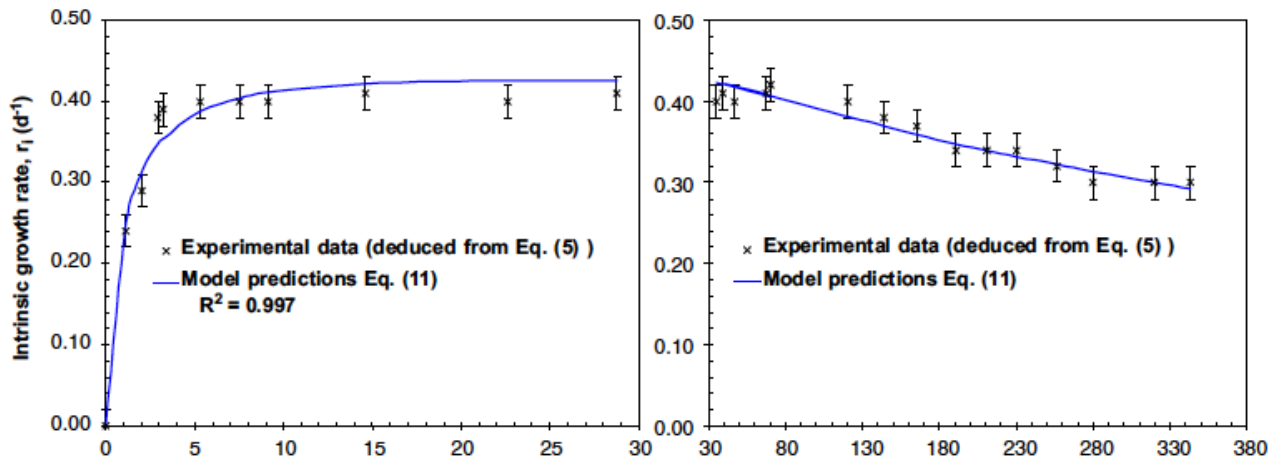
Mængden af planter pr. m^2 har betydning for væksthastigheden, idet få planter naturligvis giver lav vækstrate, da planterne formerer sig vegetativt. Til gengæld hæmmes væksten når plantetætheden bliver for stor, således at der opstår flere lag, hvorved de øverste skygger for de underliggende lag. Lasfara et al. (2007) angiver $103 \text{ g tørsvægt pr. m}^2$ (1.716 v på våd basis) som plantetæthed ved start, og $176 \text{ g tørsvægt pr. m}^2$ (2.933 g på våd basis) som det maksimale plantedække.

Næringsstoffer:

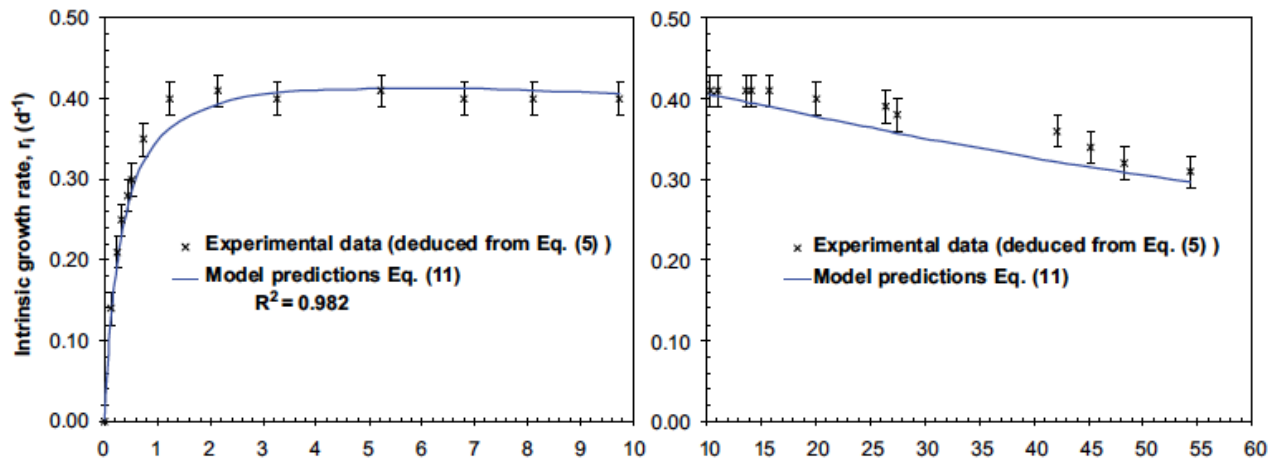
Andemad er meget tolerant overfor varierende mængder af næringsstoffer.

Figur 3 og 4 viser indflydelsen af forskellige koncentrationer af N og P på vækstraten. Det ses at der kan opnås en optimal vækst ved koncentrationer fra lidt under 10 til lidt over 30 mg N/l, medens planterne kan klare op til ca. 330 mg N/l uden alvorlig nedgang i vækstraten.

De tilsvarende tal for P er 2 – 10 mg P/l og en inhiberende koncentration omkring 55 mg P/l.



Figur 3. Vækstraten for *Lemna minor* som funktion af koncentrationen af N (mg N/l) (efter Lasfara et al.(2007)).



Figur 4. Vækstraten for *Lemna minor* som funktion af koncentrationen af P (mg P/l) (efter Lasfara et al.(2007)).

Beregningsmodel

Tabel 1: Parametre, der indgår i beregningsmodellen.

Parameter (Konstante)	Værdi (Interval eller anbefalet værdi)	Betegnelse
Maksimum intrinsisk vækstrate	0,62	R
Temperatur optimal	26°C (5-35°C)	T _{op}
Temperatur aktuel		T
Daglængde optimal	13 timer	E _{op}
Daglængde aktuel		E
Maksimal plantedække (g tørvægt/m ²)	176 g	D _L
Konstant	0,0025	□ ₁
Konstant	0,66	□ ₂
Konstant	0,0073	□ ₃
Konstant	0,65	□ ₄
Mindste N-koncentration	0,95 mgN/l	K _N
Maksimal (inhiberende) N-koncentration	604 mgN/l	K _{IN}
Mindste P-koncentration	0,31 mgP/l	K _p
Maksimal (inhiberende) P-koncentration	101 mg P/L	K _{IP}
Aktuel plantedække (g tørvægt/m ²)		D
Plantedække ved start (g tørvægt/m ²)	(103g)	D _o
Antal dage efter start		t
Aktuel plantedække (g tørvægt/m ²)		D _o (Monette 2006)

Forhold mellem våd vægt:

Lemna minor: 0,104 g tør vægt for 1 g våd vægt. (0,06 i flg. tekst)

Lemna gibba: 0,114 g tør vægt for 1 g våd vægt.

Nedenstående beregningsmodel er baseret på undersøgelser af Lasfara et.al, (2007). Denne model bygger videre på undersøgelser af Monette et al. (2006). Modellen er udviklet under anvendelse af *Lemna minor* og testet på *Lemna gibba*.

Det optimale plantedække D_o, kan, efter Monette et al. (2006), beregnes ved hjælp af formel 1, t er antal dage mellem høst.

$$D_{op} = \frac{e^{-r_i \cdot t/2}}{1 + e^{-r_i \cdot t/2}} D_L \quad (1)$$

Formel 2 – 4 er en beregningsmodel opstillet af Lasfara et al.(2007).

Formel 2 beregner r_i der er den intrinsiske vækstrate. Det vil sige vækstraten, når der tages hensyn til, at vækstraten ændres når der bliver flere planter.

Formel 3 beregner det aktuelle plantedække Di g tørvægt/m²

Formel 4 beregner r_s der er den aktuelle vækstrate.

$$n = R \cdot \theta_1 \left(\frac{(T - T_{op})}{T_{op}} \right)^2 \cdot \theta_2 \left(\frac{(T - T_{op})}{T_{op}} \right)^2 \cdot \theta_3 \left(\frac{(E - E_{op})}{E_{op}} \right)^2 \cdot \theta_4 \left(\frac{(E - E_{op})}{E_{op}} \right)^2 \\ \times \frac{Cp}{Cp + Kp} \cdot \frac{Kp}{Kp + Cp} \cdot \frac{Ch}{Ch + Kn} \cdot \frac{Kn}{Kn + Ch} \quad (2)$$

$$D = \frac{D_L \cdot D_0}{(D_L - D_0) \cdot e^{-r_s t} + D_0} \quad (3)$$

$$r_s = \frac{1}{t} \cdot \ln \left(\frac{D_L}{(D_L - D_0) \cdot e^{-r_s t} + D_0} \right) \quad (4)$$

Bilag 2

Pilotbassin

Amigo



Veje Engineering, vinter



Testbassin, Lynggården

Opbygning





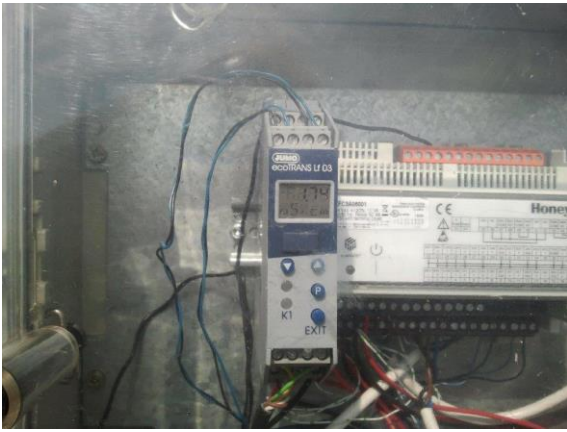
Fremmedlegemer i gyllen



Et kig ned i 'gylletanken'



Processen



Ledningsevne måler



Montering af pumpe



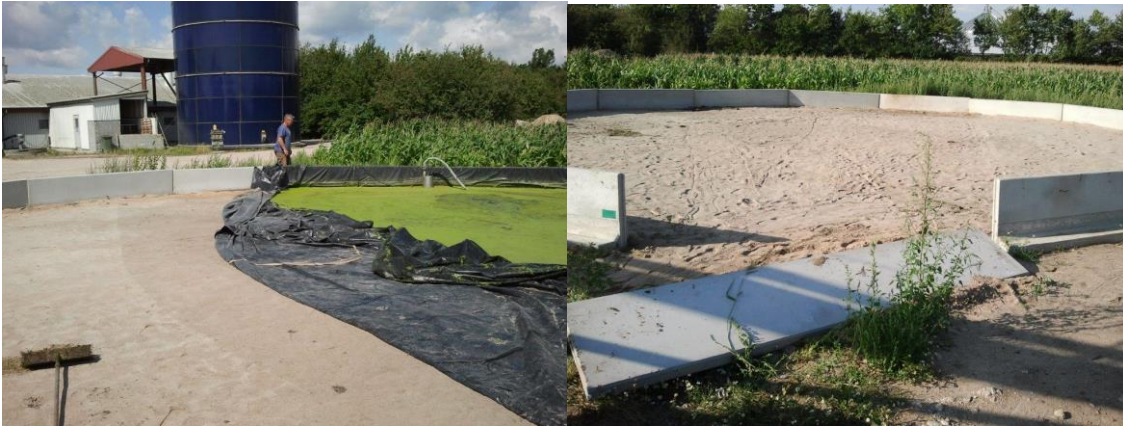
Død andemad før iltning



Indledende iltningsforsøg



Efter iltning
Fjernelse af anlæg





Naturstyrelsen
Haraldsgade 53
DK - 2100 København Ø
Tlf.: (+45) 72 54 30 00
www.nst.dk