



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renseanlæg

Optimeret forbehandling

ICEU del 1 – november 2013

**Titel:**

Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renselanlæg

Redaktion:

EnviDan A/S

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

EnviDan A/S; Johan van der Plaats

Illustration:

EnviDan A/S

År:

2013

ISBN nr.

978-87-7091-962-3

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
Konklusion	7
Summary in English	9
1. Indledning.....	11
2. Baggrund.....	12
3. Forbehandlingsmetoder	15
3.1 Traditionel kemisk forfældning.....	15
3.2 Forbehandling med biosorption.....	15
3.3 Forbehandling med filtre.....	16
3.4 Energi og kulstof massebalance	16
3.5 Valg af forbehandlingsmetode.....	18
3.5.1 Drifts- og investeringsomkostninger.....	19
4. Styring af kulstoffodsering.....	22
5. Optimeret styring af primærfældning.....	23
5.1 Case – Thisted Renseanlæg.....	24
5.2 Resultater	25
Referencer	28
Supplerende litteratur	28
Bilag 1: Styring af kulstoffodsering.....	30

Forord

Dette udviklingsprojekt er udarbejdet af den danske rådgivende ingeniørvirksomhed EnviDan A/S og udgivet af Miljøstyrelsen. Kvalitetssikring af projektet er foretaget af Mogens Henze, Professor Emeritus, DTU Miljø.

Projektet er udarbejdet i perioden fra januar 2012 til november 2013.

Udviklingsprojektet omhandler optimeret og intelligent udnyttelse af spildevandets indhold af organisk stof, herunder fokus på at minimere energiforbruget til de biologiske processer samt optimal udnyttelse af renselanlæggets gasproduktion. Ved at betragte spildevand som en ressource er vi et skridt tættere på optimal udnyttelse af spildevandets energipotentialer og det energiproducerende renselanlæg.

Baggrunden for udviklingsprojektet er, at vi står overfor væsentlige klimaforandringer, hvorfor udledningen af drivhusgasser skal reduceres. Regeringen har som ambition, at sikre en reduktion på 40 % af de danske udledninger af drivhusgasser i 2020 i forhold til 1990. Dette gælder ikke mindst for spildevandsområdet, hvor der i håndteringen af vores spildevand anvendes store mængder energi. Omkring 1,5 % af verdens udledning af drivhusgasser stammer fra spildevand [Andersen, 2008].

Udviklingsprojektet er delt op i 4 dele omhandlende intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renselanlæg ved henholdsvis optimeret forbehandling, optimeret rådnetanksdrift, optimeret rejektvandsbehandling og optimeret udnyttelse af gasproduktion fra rådnetanksdrift. Med det samlede koncept kaldet "Intelligent Carbon and Energy Utilisation" (ICEU) tages der udgangspunkt i de danske renselanlæg.

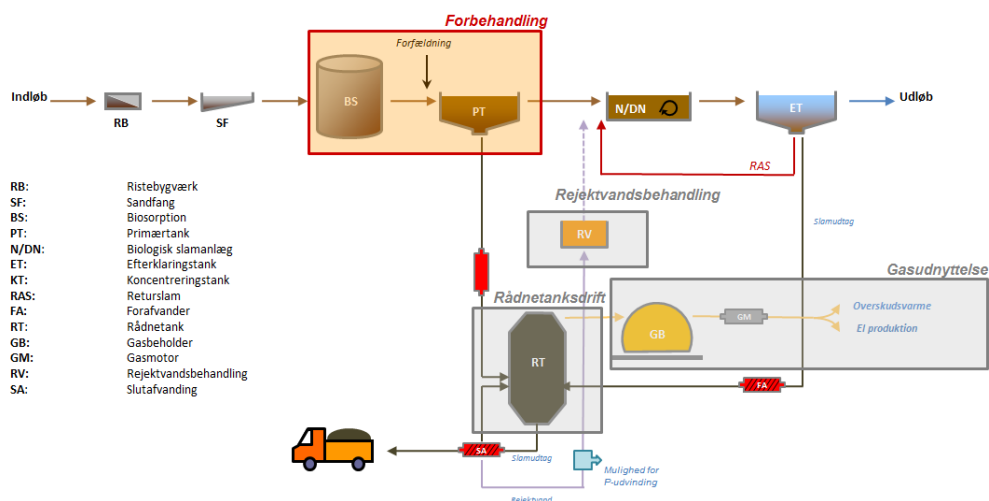
Nærværende rapport udgør delprojekt 1 af EnviDan's udviklingsprojekt "Intelligent Carbon and Energy Utilisation" (ICEU), og omhandler vurdering og dokumentation af teknologier til optimeret forbehandling.

Udviklingsprojektet er udarbejdet med støtte fra Miljøstyrelsen fra puljen miljøeffektiv teknologi, med journal nr. NST-404-00091.

Professor Emeritus Mogens Henze har forestået kvalitetssikring.

Sammenfatning

EnviDan søgte i 2011 Miljøministeriet om støtte til en række udviklingsprojekter under puljen ”Tilskud til miljøeffektiv teknologi”. Tilskuddet blev bevilget af Miljøministeriet til dokumentation af EnviDans koncept for ”Intelligent Carbon and Energy Utilisation” ICEU, der omhandler udnyttelsen af energipotentialt i råspildevand afledt til offentlige spildevandsanlæg.



FIGUR 1: DET SAMLEDE KONCEPT ”INTELLIGENT CARBON AND ENERGY UTILISATION” (ICEU) OMHANDLENDE OPTIMERET FORBEHANDLING, RÅDNETANKSDRIFT, REJEKTVANDSBEHANDLING OG OPTIMERET UDNYTTELSE AF GASPRODUKTION FRA RÅDNETANKSDRIFT.

Rapporten omhandler gennemførelse af EnviDans udviklingsprojekt ”Intelligent Carbon and Energy Utilisation” ICEU – Del 1 optimeret forbehandling. I delprojektet er fokuseret på optimal udnyttelse af andelen af organisk stof, der kan anvendes til gasproduktion ved indføring af intelligent forfældning. For optimal styring af kulstoffordeling mellem rådnetank og det biologiske afsnit benyttes den anaerobe tid i renseanlægget som udtryk for renseanlæggets restkapacitet, idet der i dette tidsrum hverken er behov for fjernelse af ammonium eller nitrat. COD tilført det biologiske renseanlæg reguleres ved ændring af bypass, dosering af fældningskemikalier eller tilbageførsel af udtaget primærslam, således det biologiske trin drives med så lille restkapacitet som muligt.

Forskellige strategier for optimering af primærfældningen har været overvejet i dette projekt. Som en del af projektet er der gennemført et litteraturstudie. Herved behandles forskellige styringsmetoder og konklusionerne fra aktuelle publicerede artikler vedr. styring af kulstoffodsering i aktiv-slamanlæg.

Der er i projektet screenet data fra 3 større anlæg for at finde en relation mellem indløbsflow og COD i overløb forbehandling samt indløbsflow og SS i overløb forbehandling. Der er i alle tilfælde opnået en dårlig korrelation. Yderligere undersøgelser er nødvendige for at klarlægge, om der kan findes en korrelation.

I forbindelse med projektet er der foretaget fuldskalaforsøg på Thisted Renseanlæg med justering af fældningskemikalier for gennemførelse af en hårdere fældning og dermed øget fjernelse af COD hen over forbehandlingstrinnet. Forsøget har vist, at en styring efter COD/N og COD/P ikke er mulig, da en stor forskel i kemikaliedosering ikke har kunnet ses slå igennem på de to styringsparametre. En god styring af COD-fordelingen mellem rådnetank og det biologiske rensetrin tager udgangspunkt i en simpel styring, der udnytter den opsamlede information omkring kvælstoffjernelsen via online styring. Renseanlæggets kapacitet måles ved opdeling i nitrifikationstid, denitrifikationstid samt anaerob tid, hvor den anaerobe tid udtrykker renseanlæggets restkapacitet. Når hovedanlægget drives med så lav restkapacitet som muligt presses denitrifikation til det yderste, og herved opnås maksimalt udtag af COD til anaerob udrådning.

En overordnet energikonsekvensberegning ved at gå fra en COD fjernelse på 55 % til 65 % i forbehandlingen (1250 kg COD/d eller 10.000 PE) resulterer i en energibesparelse på 168 MWh/år vedr. beluftning samt en ekstra el- og varmeproduktion fra det øgede udtag af primærslam på 412 MWh/år. Dette resulterer i et samlet nettoenergipotential på 581 MWh/år eller ca. 5,8 kWh/PE/år.

På baggrund af gennemført massebalance ved 3 forskellige COD/Total-N forhold i råspildevandet vurderes følgende:

- Spildevandssammensætningen i almindeligt husspildevand (COD/Total-N = 10,5) muliggør en COD fjernelse på 46 % svarende til en traditionel forfældning med 15-20 % bypass. Dette er forudsat rejektivandsbehandling. Reduktionspotentialet ved traditionel forfældning, biosorption eller forfiltrering udnyttes i dette tilfælde langt fra.
- For optimal udnyttelse af reduktionspotentialet ved traditionel forfældning kræves et COD/Total-N forhold på 12,5 forudsat rejektivandsbehandling.
- For optimal udnyttelse af reduktionspotentialet ved biosorption eller forfiltrering kræves et COD/Total-N forhold på 15,5 forudsat rejektivandsbehandling.
- I alle tilfælde gælder, at udnyttelsespotentialet for de tre forfældningsmetoder reduceres ca. 7 procentpoint (procentuel COD fjernelse) uden separat rejektivandsbehandling.
- Det vil kun være relevant med biosorption eller forfiltrering på renseanlæg, hvor en industribelastning øger den organiske stoftilførsel og dermed COD/Total-N forholdet.

Det fremgår af beregningerne, at såfremt spildevandet har et COD/Total-N forhold over 15 forudsat separat rejektivandsbehandling samt et højt indhold af opløst organisk stof, svarende til et SS/BOD forhold $< 0,8-1$, så er der set over en 10 årig periode en økonomisk gevinst ved etablering af et biosorptionstrin. Derimod er der ikke umiddelbart en økonomisk gevinst ved etablering af forfiltrering. Denne løsning kan dog overvejes, såfremt der er begrænsede udbygningsmuligheder arealmæssigt.

Konklusion

Ved en spildevandssammensætning svarende til almindeligt husspildevand (COD/Total-N = 10,5) anbefales traditionel forfældning, idet denne teknologi har tilstrækkeligt reduktionspotentiale for maksimalt udtag af COD. Ved en spildevandssammensætning med meget opløst organisk stof anbefales forbehandling med biosorption. Gennem traditionel kemisk forfældning med dosering af fældningskemikalier f.eks. jern- eller aluminiumholdige produkter kan der opnås en øget fjernelse af COD henover forklaringstankene. COD-fjernelsen er typisk på 55 %.

Ved biosorption blandes spildevandet med primærslam samt tilføres en mindre luftmængde, hvor der sker en øget adsorption af COD og suspenderet stof til primærslammet. Efter biosorptionstanken sker en separering af forrenset spildevand og primærslam i forklaringstankene. COD fjernelsen ved benyttelse af fældningskemikalier (jernsalte og polymer) er typisk 60 -70 %. Fordelen ved en biosorptionsproces er at kolloid materiale indfanges, således dette udtages i forklaringstankene. Biosorption bør af samme grund primært anvendes i tilfælde af, at der er en meget høj opløst fraktion i råspildevandet (SS/BOD < 0,8-1). Det vil kun være relevant med biosorption eller forfiltrering på renseanlæg, hvor en industribelastning øger den organiske stoftilførselse således COD/Total-N > 15.

De enkelte renseanlæg vil have forskellige optimeringspotentialer ved forbehandling med udtag af primærslam afhængigt af spildevandets COD/Total-N forhold. Jo højere COD/Total-N forhold desto større potentiale for udtag af primærslam. For at sikre en tilstrækkelig god denitrifikation skal dette forhold være større end ca. 6 - 8 ind i hovedanlægget, til det biologiske afsnit med kvælstoffjernelse. Den laveste værdi kan accepteres i tilfælde af, at der er implementeret avanceret onlinestyling og slamhydrolyse. Begge COD/Total-N forhold er baseret på, at hovedparten af den videreførte COD fra primærtankene er letomsættelig, idet den består af en høj fraktionen af opløst COD.

Spildevandssammensætningen i almindeligt husspildevand (COD/Total-N = 10,5) muliggør en COD fjernelse på 46 % svarende til en traditionel forfældning med 15-20 % bypass forudsat et COD/N forhold i hovedanlægget på 6. Dette er forudsat rejektivandsbehandling på det ammoniumholdige rejektivand fra slutafvandingen. Reduktionspotentialet ved traditionel forfældning, biosorption eller forfiltrering udnyttes i dette tilfælde langt fra.

For optimal udnyttelse af reduktionspotentialet ved traditionel forfældning kræves et COD/Total-N forhold på minimum 12,5 i indløb forudsat rejektivandsbehandling.

For optimal udnyttelse af reduktionspotentialet ved biosorption eller forfiltrering kræves et COD/Total-N forhold på minimum 15 i indløbet forudsat rejektivandsbehandling.

Det vil derfor kun være relevant med biosorption eller forfiltrering på renseanlæg, hvor en industribelastning øger den organiske stoftilførselse og dermed COD/Total-N forholdet.

I alle tilfælde gælder, at udnyttelsespotentialet for de tre forfældningsmetoder, forfældning, biosorption og forfiltrering, reduceres uden separat rejektivandsbehandling, hvorfor separat rejektivandsbehandling anbefales.

Der ses et behov for yderligere indsamling af data for at kunne finde en korrelation mellem indløbsflow og indholdet af COD eller SS efter forbehandling. Der er ligeledes behov for yderligere arbejder for at fastlægge en styringsstrategi.

Summary in English

This research and development project is about intelligent use of carbon and energy resources in raw municipal wastewater. The project evaluates the energy potential in wastewater and potentials in optimizing wastewater treatment plants to become energy neutral or even produce energy in excess.

The project was carried out from September 2012 to November 2013.

The project aims to provide a basis for selecting the economic and environmental most attractive technologies for optimized pretreatment in municipal wastewater treatment plants.

This report is the 1th part of the overall Intelligent Carbon and Energy Utilization (ICEU) project and investigates methods for optimized pretreatment.

The project focuses on optimizing the share of organic matter that can be “harvested” for gas production by introduction intelligent pretreatment.

As part of the project, a literature study has been conducted. This examines various management methods and conclusions of the current published articles concerning control of carbon dosing in activated sludge plants.

Data from three large wastewater treatment plants has been screened in order to find a relation between respectively the inlet flow and COD in the bypass of the pretreatment and inlet flow and SS in the bypass of the pretreatment. In all cases a poor correlation was achieved.

During the project, tests with adjustment of precipitation chemicals have been carried out at the Wastewater Treatment Plant in Thisted. The aim of the tests was achieving a more efficient precipitation. The experiment has shown that control based on COD/N ration and COD/P ration is not efficient, as a large difference in chemical dosing has not shown a visible change of the two control parameters.

A good distribution of the COD between the digester and the activated sludge plant was found with a simple control mechanism that utilizes the collected information about removal of nitrogen through online control. For optimal control of carbon allocation between the digester and the activated sludge plant the anaerobic time in the activated sludge plant is used as a measure of residual capacity of the wastewater treatment plant. In this phase there is no need for removal of ammonium or nitrate. COD added to the biological treatment plant is regulated by changing the bypass, dosage of precipitation chemicals or primary sludge dosage, thus the biological stage is operated with as little residual capacity as possible.

The individual treatment plants will have different optimization potentials for pretreatment depending on the ration of COD / Total N in the incoming wastewater. The higher COD/Total N ratio, the greater potential for harvesting organic matter with primary sludge. In order to ensure sufficient denitrification, this ratio must be minimum 6-8 in the activated sludge plant with nitrogen removal. A COD/Total N ration at 6 may be accepted, if there is implemented on-line control and sludge hydrolysis.

Wastewater composition of ordinary domestic wastewater (COD/Total N = 10.5) allows a COD harvest of approximately 46 %, equivalent to a traditional precipitation with 15-20% bypass, providing that sludge liquor is treated in an ANAMMOX plant without need for COD.

With a wastewater composition similar to ordinary domestic wastewater (COD/Total N = 10.5) traditional precipitation is generally recommended, as this technology has sufficient reduction potential for maximum harvest of COD. Through conventional chemical precipitation, with dosage of products containing for example iron or aluminum, a COD harvest of 55% is typical. The reduction potential of traditional precipitation, biosorption or pre-filtration can therefore not be used to its full extent with ordinary domestic wastewater.

Maximum utilization of the reduction potential of traditional precipitation require a COD / Total N ratio of at least 12.5 in the incoming wastewater, providing that sludge liquor is treated in an ANAMMOX plant, without need for COD.

Where an industrial load increases the organic matter, thus the COD/Total N ration is increased (>15) it can be relevant to add biosorption-step or pre-filtration to the pretreatment. Biosorption is however only feasible, if there is a high content of dissolved organic matter (SS/BOD < 0.8-1).

With biosorption wastewater is mixed with primary sludge and a small amount of air is applied, resulting in an increased adsorption of COD and suspended solids to primary sludge. After biosorption, the wastewater will be led to the pretreatment tank for precipitation. Through biosorption followed with conventional chemical precipitation, with dosage of products containing for example iron or polymer, a COD harvest of 60-70% is typical.

1. Indledning

Nærværende rapport omhandler gennemførelse af et af de 4 delprojekter under EnviDans udviklingsprojekt "Intelligent Carbon and Energy Utilisation". Delprojektet optimeret forbehandling omhandler vurdering og dokumentation af teknologier til forbehandling i forbindelse med udtagelse af primærslam.

Delprojektet tager udgangspunkt i, at anskue spildevand som en ressource, der kan udnyttes mere optimalt på renseanlæg. En forudsætning for at udnytte spildevandets energipotentialer er, at tage størst mulige mængder organisk kulstof ud og sende til udrådning, og samtidig undgå, at kulstof brændes af til ingen nytte via beluftningen i renseprocessen.

Der er foretaget en kort beskrivelse af 3 kommercielle teknologier til forbehandling og de typiske reduktionsgrader for COD. Efterfølgende præsenteres en teoretisk energi og kulstofbalance ved 2 forskellige reduktionsgrader af COD samt en tilhørende energikonsekvensberegning. Der foretages en sammenligning af anlægsinvestering og driftsomkostninger.

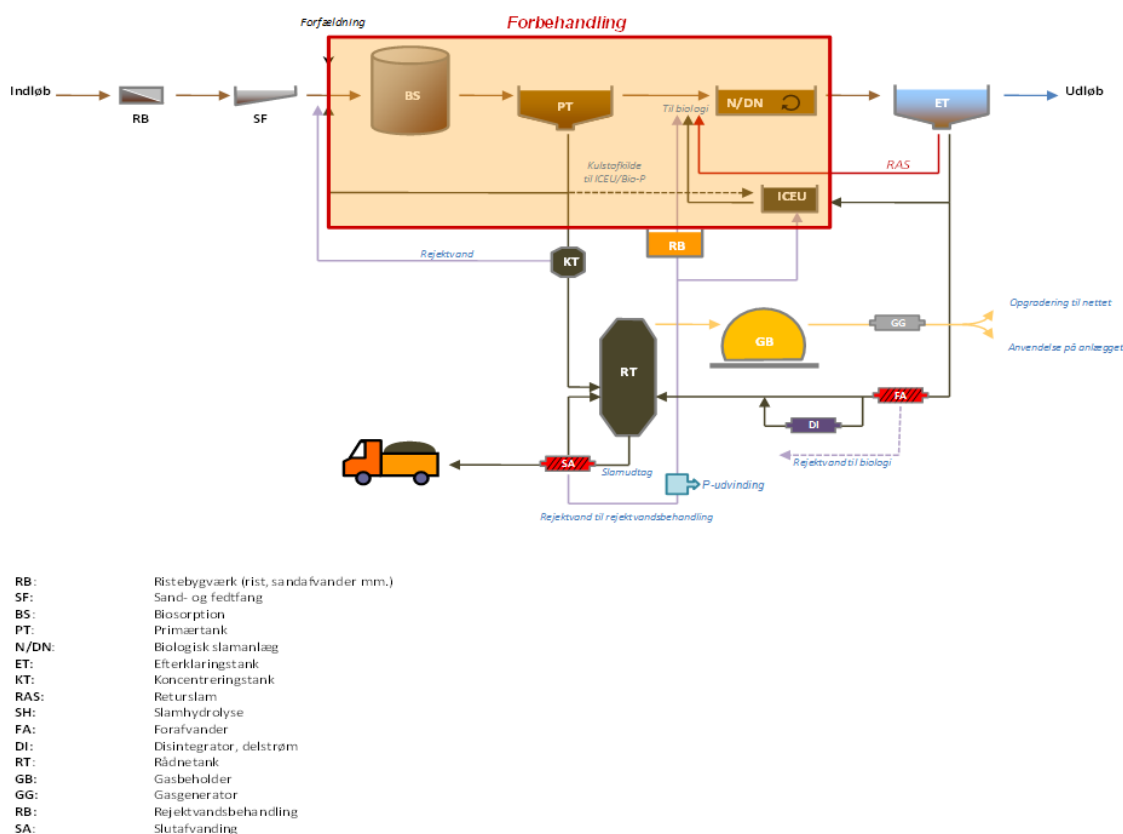
I delrapporten præsenteres ligeledes resultaterne af fuldskalaforsøg gennemført på Thisted Renseanlæg. Forsøgene har haft til formål at belyse potentialer ved øget kulstofudtag hen over et eksisterende biosorptionstrin på Thisted Renseanlæg.

Endelig er foretaget et litteraturstudie for afdækning af eksisterende viden omkring styring af kulstoffordeling.

2. Baggrund

EnviDan søgte i 2011 Miljøministeriet om støtte til en række udviklingsprojekter under puljen "Tilskud til miljøeffektiv teknologi". Tilskuddet blev bevilget af Miljøministeriet til dokumentation af EnviDans koncept for "Intelligent Carbon and Energy Utilisation" ICEU, der overordnet omhandler udnyttelsen af energipotentialet i råspildevandet afledt til renseanlæg.

Det biologiske og kemiske primærtrin betragtes som en afgørende enhed for optimal udnyttelse af spildevandets energipotentiale. Dette er kombineret med en ICEU-enhed som sikrer optimal og minimal tilførsel af kulstof til renseprocesserne, så kun den absolut nødvendige mængde kulstof bliver til CO₂, jf. Figur 2.1.



FIGUR 2.1: ILLUSTRATION AF FORBEHANDLINGSDELEN I ICEU-KONCEPTET.

For energibesparelser på spildevandsrensning har markedet indtil videre haft fokus på optimeret styring samt mere energirigtig maskinbestykning. Markedspotentialet for energirigtigt design af de biologiske processer er endnu ikke fuldt udnyttet - her vurderes det, at projektet kan bidrage væsentligt.

Optimal udnyttelsen af COD fra råspildevand er knyttet til håndteringen af spildevandets forskellige fraktioner, og hvordan disse håndteres på anlægget. Grundlæggende handler det om, at øge udtaget af organisk kulstof med primærslam, optimere rådnetanksdriften og på bedst mulige måde udnytte produktet fra gasproduktion.

Der er ydet støtte til dokumentation/undersøgelse af følgende delelementer i ICEU projektet:

1. *Forbehandling øget COD udtag med primærslam*
2. Optimeret rådnetanksdrift
3. Optimeret rejektivandsbehandling
4. Udnyttelse af gasproduktion fra rådnetank

Pkt. 2, 3 og 4 behandles særskilt under separate udviklingsprojekter, mens pkt. 1 omhandlende forbehandling behandles i denne rapport.

Gennemførelsen af udviklingsprojektet baseres i første omgang på basis af resultater fra eksisterende anlæg og allerede udførte forsøg. Dette materiale vil danne grundlag for beslutning om eventuelle yderligere forsøg til dokumentation af teknologien eller ICEU konceptet som helhed. Som supplement hertil gennemføres et litteraturstudie, der sammen med eksisterende data skal danne basis for omfang og indhold af de enkelte forsøg. Der opstilles herefter en plan over de forsøg, der vurderes nødvendige for hele projektets gennemførelse.

Dette projekt vil specifikt øge andelen af organisk stof, der kan anvendes til gasproduktion ved at:

- nytænke opbygningen af primærtrinnet med f.eks. biosorption og belastningsstyret forfældning.
- indføre en styret fordeling af kulstoffet mellem rådnetank og de biologiske renseprocesser, på baggrund af behovsmålinger ved f.eks. monitoring af denitrifikationsraten, COD/N eller COD/P forhold.
- trimme renseanlæggets biologiske kvælstoffjernelse og bio-P, så letomsætteligt kulstof ikke tabes til beluftning, men anvendes til det rette formål og kun i den akkurat nødvendige mængde.

Målet er at designe et koncept, der let passer ind i opbygningen af de renseanlæg der eksisterer i dag, og derfor kan implementeres uden de store ombygninger og maskininvesteringer.

Der undersøges endvidere, hvordan en konventionel aktiv slam proces, der er placeret efter et biologisk og kemisk primærtrin, kan drives og styres således, at der anvendes et minimum af organisk stof til at drive kvælstoffjernelse og biologisk fosforfjernelse.

Specifikt for forbehandlingsdelen forventes følgende miljømæssige effekter opnået:

- Som resultat af et forbedret primærtrin vil andelen af kulstof der kan anvendes til gasproduktion øges med op til 20-30 %.
- Øget kulstofmængde til gas medfører tilsvarende lavere energiforbrug til håndtering af denne.
- CO₂ udledning mindskes, idet både mindre energi anvendes, energi produceres og CO₂-emission ændres til gas.
- Der opnås en mere stabil drift af renseanlægget som helhed, da det biologiske og kemiske primærtrin udjævner belastningen markant.
- Reduceret energiforbrug i det biologiske trin og deraf følgende reduktion i udledning af drivhusgasser relateret til spildevandsrensningen.
- Øget energiproduktion i rådnetanke.
- Dosering af eksternt kulstofkilde til denitrifikation elimineres. Dermed belastes renseanlæggets hovedanlæg ikke unødvendigt, hvilket forventeligt vil give sig udtryk i bedre afløbsværdier sammenlignet med konventionelle aktive slam anlæg.

EnviDan vil ved projektets afslutning kunne anvise, hvordan et biologisk primærtrin og kemisk fældning af primærslam, vil kunne styres intelligent. Samlet vil det betyde, at den kulstof-energi, der tilledes renseanlægget, udnyttes bedre, og at mere kulstof resulterer i biogas i stedet for CO₂. Thisted Spildevand, der deltager i projektet vil ved projektets afslutning have et indblik i, hvordan det deltagende renseanlæg kan få en bedre udnyttelse af spildevandet som energiresource. Deltagelse i udviklingsprojektet vil være et skridt i retningen mod at minimere renseanlæggets samlede energiforbrug og samtidig også anlæggets carbon footprint i dobbelt forstand, da der både bruges mindre energi og genereres mindre CO₂ af de biologiske processer.

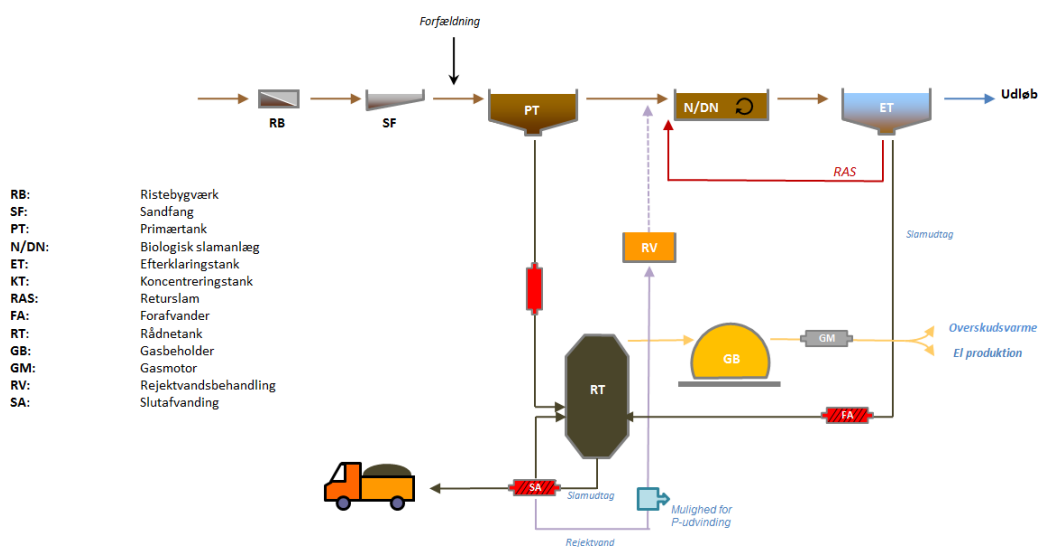
Erfaringerne fra projektet vil kunne applikeres på renseanlæg, hvor der findes forklaringstanke og rådnetanke resulterende i øget gasudbytte og mindsket energiforbruget og CO₂-emission. Samlet set vurderes det, at projektet vil være et vigtigt skridt mod at opnå en bedre udnyttelse af carbonenergiressourcen i spildevandet. Projektet vil være med til at nedbryde nogle af de eksisterende effektivitetsbarrierer og gøre energi- og CO₂-besparende løsninger indenfor spildevandsområdet mere attraktive for forsyningerne.

3. Forbehandlingsmetoder

Biogasproduktionen kan øges ved at øge mængden af primærslam, der tilledes rådnetanke. Dette kan opnås gennem en øget renseseffektivitet henover de eksisterende forklaringsstanke ved implementering af traditionel kemisk forfældning. Alternativt kan benyttes teknologierne biosorption eller forfiltrering med skivefiltre.

3.1 Traditionel kemisk forfældning

En øget fjernelse af COD og SS henover forklaringsstankene kan opnås ved traditionel kemisk forfældning gennem dosering af fældningskemikalier f.eks. jern- eller aluminiumholdige produkter. COD fjernelsen er typisk på 50 - 60 %. Udover driftsudgifterne til kemikalier vil den ekstra producerede mængde kemisk slam optage plads i rådnetankene, samt medføre ekstra udgifter til polymer.

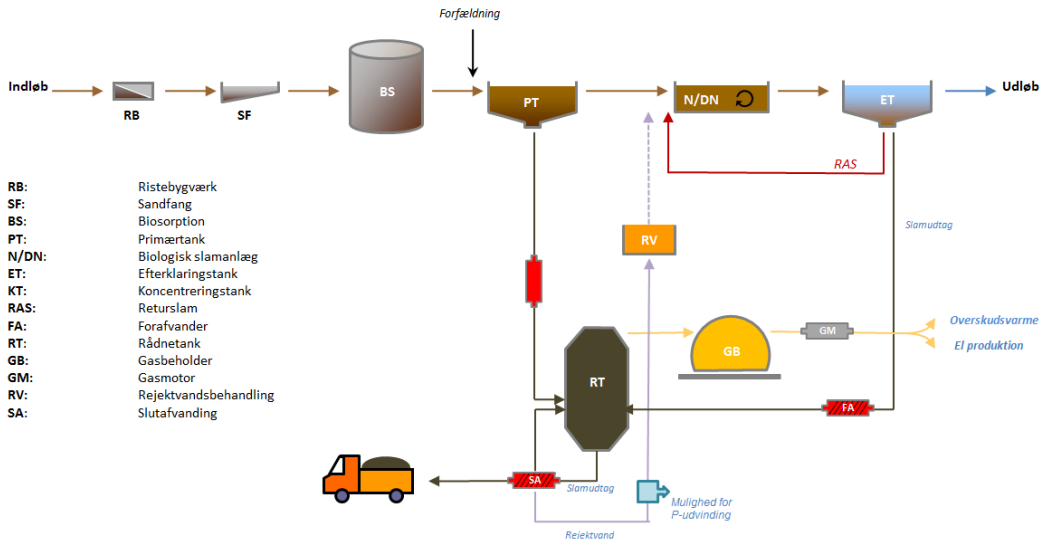


FIGUR 3.1 PROCESOVSIGT FOR RENSEANLÆG MED PRIMÆR FÆLDNING

3.2 Forbehandling med biosorption

Ved biosorption blandes spildevandet med primærslam samt tilføres en mindre luftmængde, hvor der sker en øget adsorption af COD og suspenderet stof til primærslammet. Efter biosorptionstanken sker en separering af forrenset spildevand og primærslam i forklaringsstankene. COD fjernelsen ved biosorption er erfaringsmæssigt mellem 60-70 %.

Det forrensede spildevand ledes videre til det aktive slamnæg og behandles som tidligere med de konventionelle biologiske processer. Primærslammet ledes som tidligere videre til rådnetanken. Der kan ligeledes tilsættes fældningskemikalier til forklaringsstankene, se Figur 3.2. Styrken ved en biosorptionsproces er at kolloid materiale indfanges, således dette udtages i forklaringsstankene. Biosorption bør af samme grund kun anvendes i tilfælde af, at der er en meget høj opløst fraktion i råspildevandet $SS/BOD < 0,8-1$.



FIGUR 3.2 PROCESOVSIGT MED BIOSORPTIONSTRIN

Driftsomkostningerne for biosorption udgøres af energiforbrug til beluftning samt kemikalieforbrug til kemisk fældning. Til gengæld kræver implementering af biosorption en væsentligt større anlægsinvestering.

3.3 Forbehandling med filtre

En tredje mulighed er, at installere forfiltrering som teknologi til at øge udtaget af suspenderet stof. I forbindelse med forfiltreringen benyttes fældningskemikalier. COD fjernelsen ved benyttelse af fældningskemikalier (jernsalte og polymer) er typisk 60 -70 %. Denne teknologi vil ligeledes kræve en større anlægsinvestering sammenlignet med kemisk fældning i traditionelle forklaringsstanke. Til gengæld kræver løsningen kun et meget lille pladsbehov i forhold til en traditionel kemisk fældning.

For alle tre forbehandlingsteknologier gælder, at yderligere tiltag til sikring af tilstrækkeligt kulstof i det aktive slam anlæg kan blive nødvendigt, hvis der udtages for meget kulstof, hvorved COD/N forholdet bliver for lavt.

3.4 Energi og kulstof massebalance

For at illustrere potentialet ved de 3 typer forbehandling er vist et beregningseksempel med et renselanlæg belastet med 100.000 PE, hvor råspildevandets COD/Total-N forhold muliggør en øget COD fjernelse svarende til det, der typisk kan opnås med biosorption eller forfiltrering, jf. Figur 3.3.

Indløb	Forbehandling	Biologi	Udløb
Belastning 100.000 PE COD 12.500 kg/d	COD reduktion 55 % 65 %	Belastning 45.000 PE 35.000 PE COD 5.625 kg/d 4.375 kg/d	COD 280 kg/d 220 kg/d
		Rådnetank Primærslam COD 6.875 kg/d 8.125 kg/d Bioslam 2.245 kg/d 1.745 kg/d Biogas (65 % CH ₄) 2.700 Nm ³ /d 3.000 Nm ³ /d	

FIGUR 3.3: KONSEKVENSBeregning af forbehandlingsmetode.

Der er kalkuleret med 55 % COD fjernelse og 65 % COD fjernelse ved henholdsvis traditionel forfældning og biosorption samt forfiltrering. Yderligere er der kalkuleret med en udbyttekonstant på 0,4 kg SS/kg COD reduceret, 95 % rensegrad, 40 % COD omsætning af bioslam og 60 % COD omsætning af primærslam i rådnetanken, 25 % tørstofreduktion af bioslam og 40 % tørstofreduktion af primærslam i rådnetanken samt en biogasproduktion på 0,35 Nm³/kg COD reduceret.

Ved at øge COD-fjernelsen fra 55 % til 65 % opnås en belastningsreduktion til biologien på ca. 10.000 PE og et øget gasudbytte på 300 Nm³/d. Nettoenergiforskellen ved anaerob omsætning af COD i forhold til aerob omsætning er eksemplificeret ud fra aerob omsætning med bundbeluftning og anaerob omsætning med udnyttelse af biogassen på generatoranlæg. Det kræver ca. 2 kg O₂ tilført at omsætte 1 kg COD i et renseanlæg. Dette afhænger af temperatur, vanddybde, alfa-faktor, saltindhold samt tankudformning mm. Normalt bundbeluftningsudstyr vil kunne levere omkring 3 kg O₂/kWh, hvilket betyder, at der kræves ca. 0,67 kWh/kg COD reduceret.

1 kg COD reduceret giver 0,35 Nm³ metan med et energiindhold på 9-10 kWh/Nm³ metan. Benyttes et generatoranlæg vil el-virkningsgraden og varmekoefficiens typisk være henholdsvis 0,38 og 0,46. Erfaringsmæssigt benyttes 50 % af varmeproduktionen til at dække varmetab og varmeforbrug til drift af en mesofil drevet rådnetank med slam/vandveksling. Nettoenergiindholdet ved fjernelse af 1 kg COD bliver derved ca. 2,0 kWh. Nettoenergiproduktionen ved anaerob omsætning af 1 kg COD i forhold til aerob omsætning i et aktiv slamanlæg bliver derved ca. 2,7 kWh/kg COD reduceret under de givne omstændigheder.

På Figur 3.4 er vist en overordnet energikonsekvensberegning ved at gå fra en COD fjernelse på 55 % til 65 % i forbehandlingen med et større udtag af COD og deraf mindre belastning af det aktive slamanlæg.

Indløb		Forbehandling		Biologi		Udløb	
Belastning	100.000 PE	COD reduktion	55 %	Belastning	45.000 PE	COD	280 kg/d
COD	12.500 kg/d		65 %		35.000 PE		220 kg/d
				COD	5.625 kg/d		
					4.375 kg/d		
				Forskel	1250 kg/d		
				Reduceret	689 kg/d		
				Energibesparelse	461 kWh/d		
					168 MWh/år		
				Rådnetank			
				Primærslam			
				COD	6.875 kg/d		
					8.125 kg/d		
				Bioslam	2.245 kg/d		
					1.745 kg/d		
				Biogas (65 % CH ₄)	2.700 Nm ³ /d		
					3.000 Nm ³ /d		
				Forskel	300 Nm ³ /d		
				Metan	195 Nm ³ /d		
					1853 kWh/d		
				Generatoranlæg			
				El-virkningsgrad	38 %		
				Varmevirkningsgrad	46 %		
				Varmeforbrug og var	50 %		
				Ekstra el-varmeprodu	1130 kWh/d		
					412 MWh/år		
				Nettoenergisparelse			
				Aerob	168 MWh/år		
				Anaerob	412 MWh/år		
				Samlet	581 MWh/år		

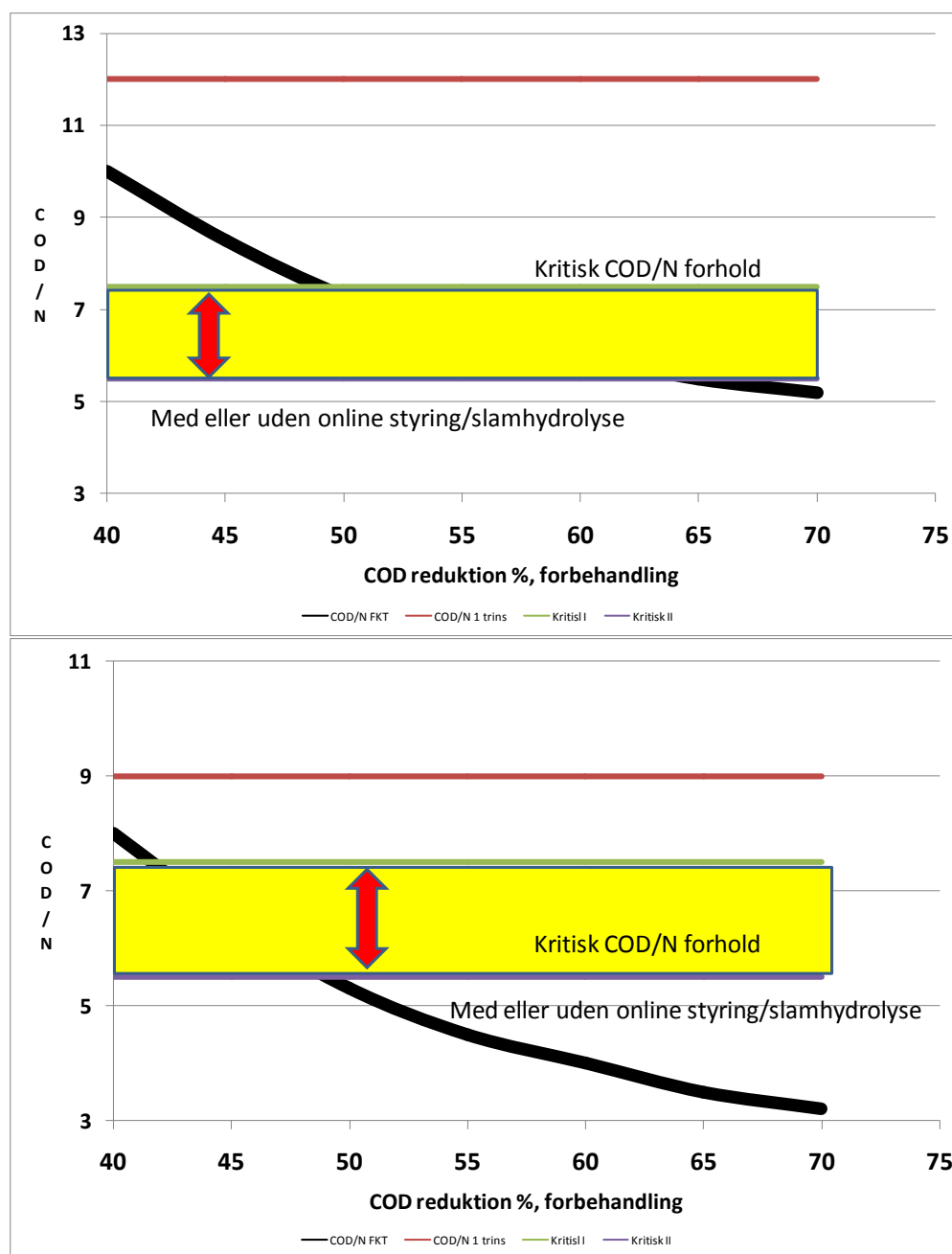
FIGUR 3.4:ENERGIKONSEKVENSBEREGNING AF FORBEHANDLINGSMETODE.

En 10 % højere COD fjernelse (1250 kg COD/d eller 10.000 PE) resulterer under ovenstående forudsætninger vedr. beluftning i en energibesparelse på 168 MWh/år samt en ekstra el- og varmeproduktion fra det øgede udtag af primærslam på 412 MWh/år. Dette resulterer i et samlet nettoenergi potentiale på 581 MWh/år eller ca. 5,8 kWh/PE/år.

3.5 Valg af forbehandlingsmetode

De enkelte renselanlæg vil have forskellige optimeringspotentialer ved forbehandling med udtag af primærslam afhængigt af spildevandets COD/Total-N forhold. Jo højere COD/Total-N forhold desto større potentiale for udtag af primærslam.

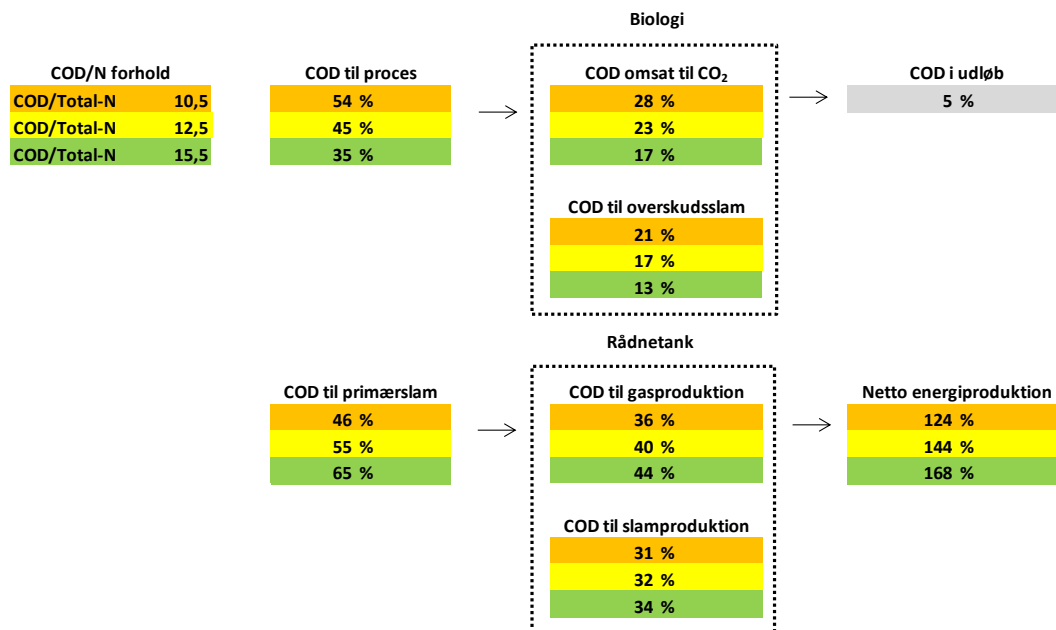
På figur 3.5 er reduktionspotentialer illustreret ved 2 forskellige COD/Total-N forhold i råspildevandet. Af figuren fremgår det, at reduktionspotentialer er afhængigt af det indkomne spildevands COD/Total-N forhold. For at sikre en tilstrækkelig god denitrifikation skal dette forhold være større end 5,5-7,5 ind til det biologiske afsnit med kvælstoffjernelse. Den laveste værdi kan accepteres i tilfælde af, at der er implementeret avanceret onlinestyling og slamhydrolyse. Begge COD/Total-N forhold er baseret på, at hovedparten af den videreførte COD fra primærtankene er letomsættelig, idet den består af en høj fraktion af opløst COD.



FIGUR 3.5: PRINCIPSKITSE AF COD REDUKTIONSPOTENTIALER I FORBINDELSE MED FORKLARING.

COD/Total-N forholdet i almindeligt husspildevand ligger typisk på 10-11. Antages kvælstoffjernelsen at kunne fungere med et COD/Total-N forhold på ca. 6, vil der med traditionel kemisk forfældning med en COD fjernelse på 55 % være brug for et by-pass på 15-20 % af råspildevandet forudsat en rejektivandsbehandling til håndtering af ammoniumholdigt rejektivand.

Det fulde potentiale af en kemisk fældning kan underlagt samme forudsætninger kun lade sig gøre med et COD/Total-N forhold på 12,5. En fjernelse på 65 % COD med forfiltrering eller biosorption er igen under samme betingelser mulig med et COD/Total-N forhold på 15,5. På Figur 3.6 fremgår COD-massebalancen ved de 3 forskellige COD/Total-N forhold.



FIGUR 3.6: COD-MASSEBALANCE VED FORSKELLIGE COD/TOTAL-N FORHOLD.

På baggrund af ovenstående massebalance vurderes følgende:

- Spildevandssammensætningen i almindeligt husspildevand (COD/Total-N = 10,5) muliggør en COD fjernelse på 46 % svarende til en traditionel forfældning med 15-20 % bypass. Dette er forudsat rejektivandsbehandling. Reduktionspotentialet ved traditionel forfældning, biosorption eller forfiltrering udnyttes i dette tilfælde langt fra.
- For optimal udnyttelse af reduktionspotentialet ved traditionel forfældning kræves et COD/Total-N forhold på 12,5 forudsat rejektivandsbehandling.
- For optimal udnyttelse af reduktionspotentialet ved biosorption eller forfiltrering kræves et COD/Total-N forhold på 15,5 forudsat rejektivandsbehandling.
- I alle tilfælde gælder, at udnyttelsespotentialet for de tre forfældningsmetoder reduceres ca. 7 procentpoint (procentuel COD fjernelse) uden separat rejektivandsbehandling.
- Det vil kun være relevant med biosorption eller forfiltrering på renseanlæg, hvor en industribelastning øger den organiske stoftilførsel og dermed COD/Total-N forholdet.

3.5.1 Drifts- og investeringsomkostninger

I nedenstående Tabel 3.1 er vist investering og forskel i driftsudgifter ved sammenligning af traditionel forfældning med biosorption og forfiltrering på et 100.000 PE anlæg.

Anlægsinvesteringer bør kun benyttes til indbyrdes sammenligning. Der er vist et scenarie, hvor der i alle 3 tilfælde er en COD fjernelse på 55 % og dernæst et scenarie, hvor der er kalkuleret med 55 % COD fjernelse ved traditionel forfældning og 65 % COD fjernelse ved biosorption og forfiltrering.

I Tabel 3.1 nedenfor synliggøres potentialet ved de 3 forskellige renseteknologier, idet den højere COD fjernelse giver besparelse på el til beluftning i det biologiske afsnit, slambortskaffelse, samt øget kraftvarmeproduktion fra en øget gasproduktion. Det er kun driftsudgifter, der varierer løsningerne imellem, som er medtaget i tabellen.

Tabel 3.1: Sammenligning af investering og forskel i driftsudgifter ved sammenligning med traditionel forfældning.			
55 % COD fjernelse i alle 3 scenarier	Traditionel forfældning [mio. kr.]	Biosorption [mio. kr.]	Forfiltrering [mio. kr.]
Investering	12	15	20
El		~0,12	~0,06
Løn		~0,01	~0,13
Polymer (forbehandling)		0	~0,23
Forskel		0,13	0,42
65 % COD fjernelse for henholdsvis biosorption og forfiltrering	Traditionel forfældning [mio. kr.]	Biosorption [mio. kr.]	Forfiltrering [mio. kr.]
El		~0,12	~0,06
Løn		~0,01	~0,15
Polymer (forbehandling)		0	~0,46
Slambortskaffelse		~-0,13	~-0,13
Polymer (slutafvanding)		~-0,02	~-0,02
El-besparelse (procesafsnit)		~-0,17	~-0,17
Kraftvarmeproduktion		~-0,23	~-0,23
Forskel		-0,42	0,12

Det fremgår af beregningerne, at såfremt spildevandet har et COD/Total-N forhold over 15 forudsat separat rejektivandsbehandling samt et højt indhold af opløst organisk stof, svarende til et SS/BOD forhold < 0,8-1, så er der set over en 10 årig periode en økonomisk gevinst ved etablering af et biosorptionstrin. Derimod er der ikke umiddelbart en økonomisk gevinst ved etablering af forfiltrering. Denne løsning kan dog overvejes, såfremt der er begrænsede udbygningsmuligheder arealmæssigt.

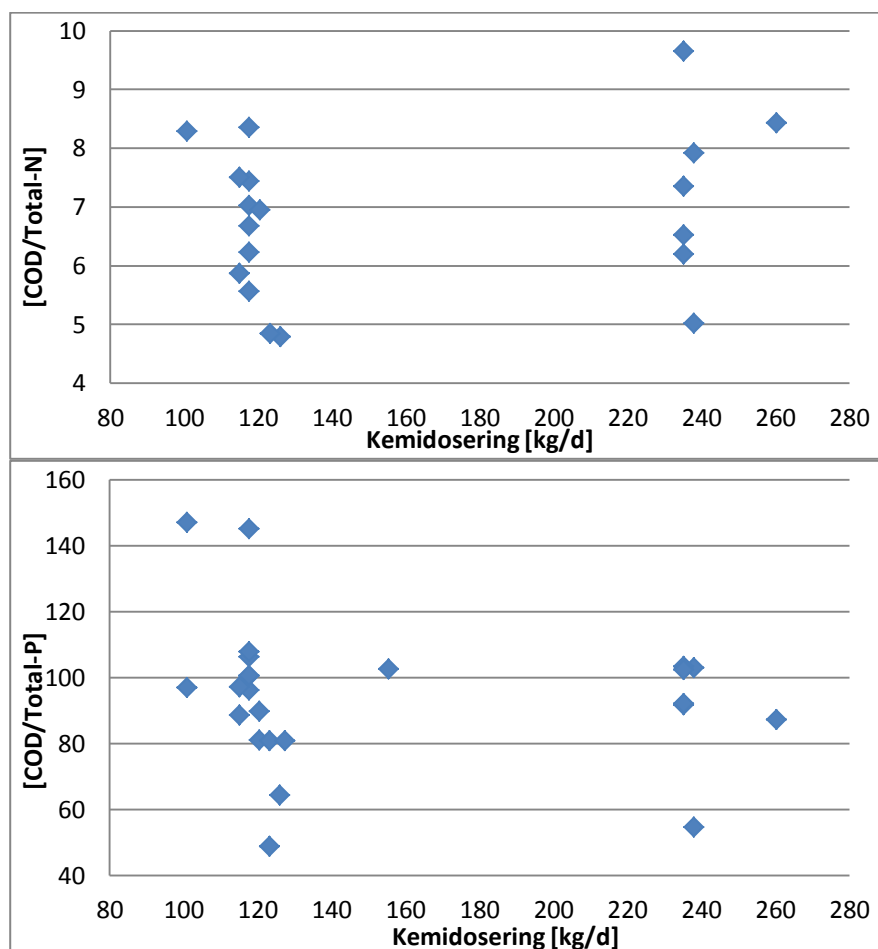
4. Styring af kulstofdoserering

Som en del af projektet er der gennemført et studie af hvilken litteratur, der er publiceret vedr. styring af kulstofdoserering i aktiv-slamanlæg. I bilag 1 er uddrag af konklusionerne fra udvalgte publikationer gennemgået.

5. Optimeret styring af primærfældning

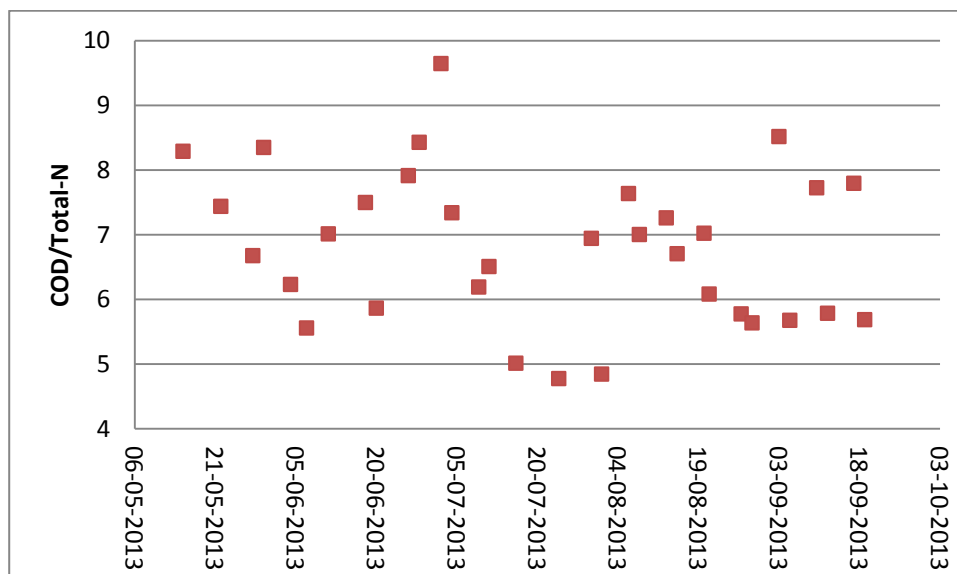
Forskellige strategier for optimering af primærfældningen har været overvejet i dette projekt. Der er i projektet screenet data fra 3 større anlæg for at finde en relation mellem indløbsflow og COD i overløb forbehandling samt indløbsflow og SS i overløb forbehandling. Der er i alle tilfælde opnået en dårlig korrelation.

Online målinger baseret på TOC eventuelt suppleret med beregninger af COD/N og COD/P samt denitrifikationshastigheder i det biologiske afsnit har ligeledes været overvejet som styringsparametre. Forsøg på Thisted Renseanlæg (biosorption og to mellemklaringstanke), se Figur 3.1 med justering af fældningskemikalier for gennemførelse af en hårdere fældning har imidlertid vist, at en styring efter COD/N og COD/P ikke er mulig, da en stor forskel i kemikaliedosering ikke har kunnet ses slå igennem på de to styringsparametre, jf. Figur 5.1.



FIGUR 5.1: COD/TOTAL-N OG COD/TOTAL-P I UDLØB MELLEMLÅRINGSSTANKE PÅ THISTED RENSEANLÆG VED VARIERET KEMIKALIEDOSERING.

En fordobling i doseringen af fædningskemikalier har ifølge driftspersonalet heller ikke kunnet ses slå igennem i det biologiske afsnit mht. denitrifikationen. På Figur 5.2 ses COD/Total-N forholdets variation gennem forsøgsperioden.



FIGUR 5.2: COD/TOTAL-N FORHOLD I TILLØB PROCESAFSNIT EFTER UDTAG AF PRIMÆRSLAM – THISTED RENSEANLÆG.

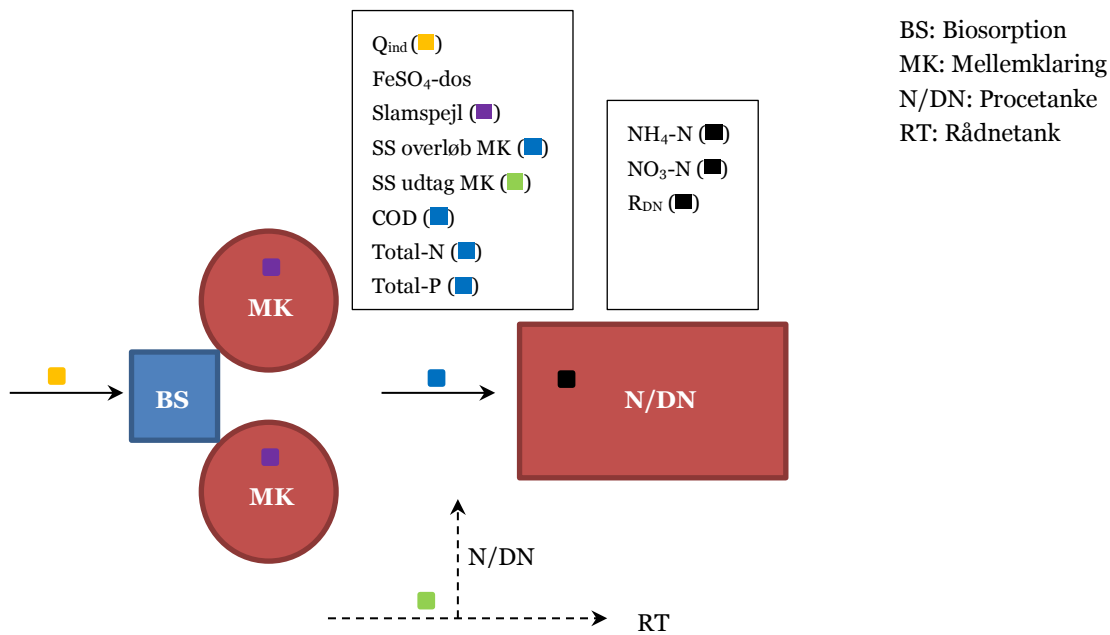
På baggrund af ovenstående erfaringer samt litteraturstudier vurderes det, at en god styring af COD-fordelingen mellem rådnetank og det biologiske rensetrin tager udgangspunkt i en simpel styring, der udnytter den opsamlede information omkring kvælstoffjernelsen via online styringen.

Renseanlæggets kapacitet måles ved opdeling i nitrifikationstid, denitrifikationstid samt anaerob tid, hvor den anaerobe tid udtrykker renseanlæggets restkapacitet, idet der i dette tidsrum hverken er behov for fjernelse af ammonium eller nitrat. COD tilført det biologiske renseanlæg reguleres ved ændring af bypass, dosering af fædningskemikalier eller tilbageførsel af udtaget primærslam, således det biologiske trin drives med så lille restkapacitet som muligt. Herved presses denitrifikation til det yderste, og herved opnås maksimalt udtag af COD til anaerob udrådning.

5.1 Case – Thisted Renseanlæg

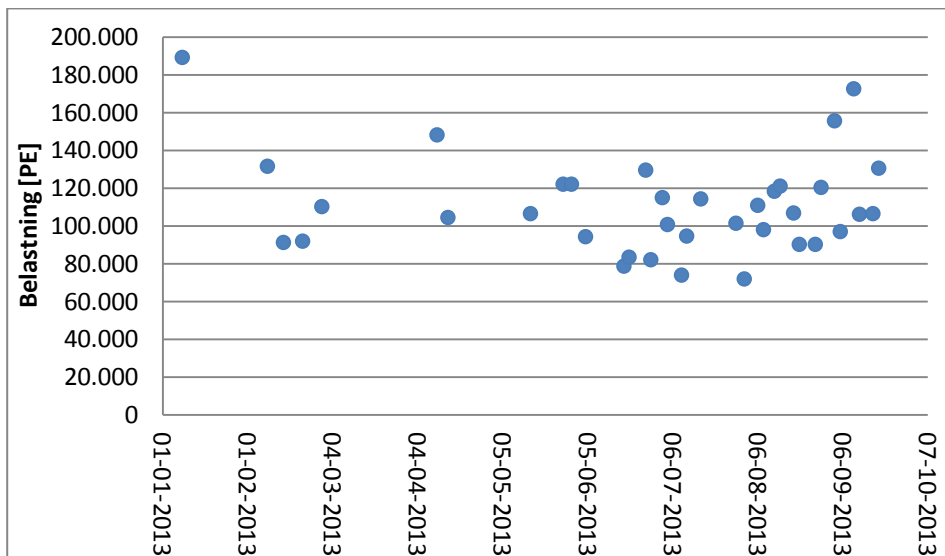
I en prøveperiode på ca. 4 måneder monteres en SS-måler til måling af suspenderet stof på overløbet af den ene mellemklaringstank. Derudover monteres en fast SS-måler, der måler på udtaget slam fra de to mellemklaringstanke efter overpumpning til primær slambuffertank. Denne benyttes sammen med flowmåler til bestemmelse af udtaget primærslammængde. Via slamspejlsmåler udføres stikprøveanalyse til bestemmelse af omtrentligt slamspejl og dets variation.

På Figur 5.3 ses prøvetagningssteder i måleprogrammet for optimeret forfældning.



FIGUR 5.3: VISNING AF PRØVEUDTAGNINGSTEDERI PRØVEPERIODEN PÅ THISTED RENSEANLÆG.

Langt størstedelen af belastningen afledt til Thisted Renseanlæg stammer fra industribelastning med et højt indhold af organisk stof. Belastningen afledt til renselanlægget i perioden januar til ultimo september 2013 er $110.500 \text{ PE} \pm 26.000 \text{ PE}$, jf. Figur 3.2 og fra testperiodens start medio maj til ultimo september 2013 ca. $107.500 \pm 22.000 \text{ PE}$. Opgørelsen er på basis af COD.



FIGUR 5.4: BELASTNING 2013 – THISTED RENSEANLÆG.

5.2 Resultater

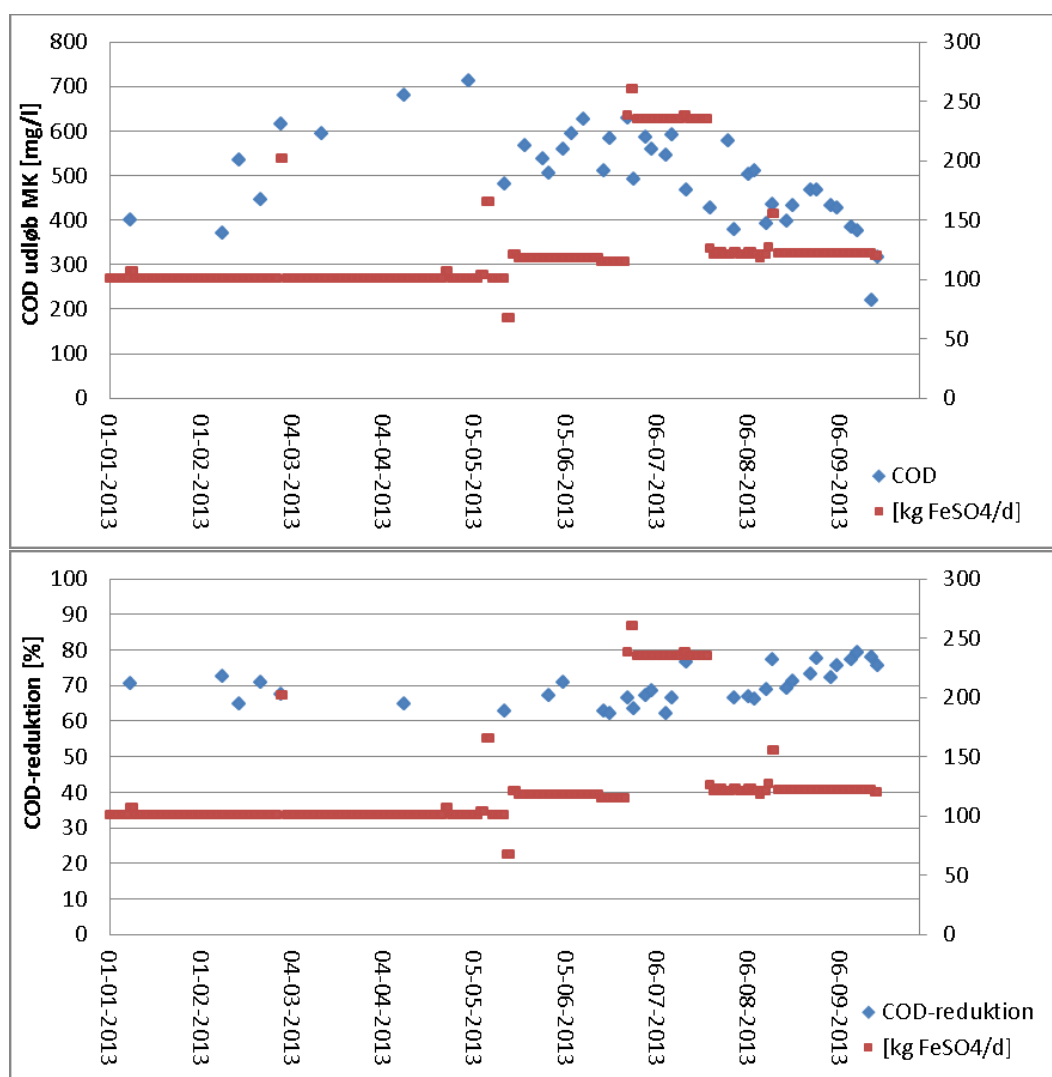
Indløbsflow, SS-koncentration i overløb mellemklaringstank, SS-koncentration i udtaget primærslam samt flowmængde udtaget af primærslam måles over en periode for at se, hvordan disse parametre ændrer sig ved ændret kemikaliedosering. Formålet er at teste indstillingen af kemikaliedoseringen, således der udtages mest muligt primærslam ved mindst mulig kemikalieforbrug.

Der måles i en periode på 2-3 uger på ovenstående parametre suppleret med tidsproportionale målinger af overløbskoncentrationer af SS, COD, Total-N og Total-P ved den eksisterende dosering af jernsulfat (FeSO_4).

Herefter måles samme parametre efter opjustering af kemikaliedosering indtil punktet for maksimal fældning findes (vurderet ud fra behandlede data). Herefter nedjusteres og optimeres kemikaliedoseringen, således maksimal fældning bibeholdes med optimalt kemikalieforbrug.

Der er gennemført forsøg med kemikaliedosering på 100, 120 og 235 $\text{kg FeSO}_4/\text{d}$ for at bestemme den optimale kemikaliedosering i forhold til reduktionsgraden henover forbehandlingstrinnet. I starten af september 2013 er der desuden optimeret på returslamføringen ved at reducere denne fra 250 m^3/h til 150 m^3/h samtidigt med et øget fokus på udtag af primærslam ved justering af pause/driftstider på overskudslampumpe flere gange om ugen.

På Figur 5.5 er COD udløbskoncentrationen fra mellemklaringstankene samt COD-reduktionsgraden gennem hele forsøgsperioden sammenholdt med kemikaliedoseringen.



FIGUR 5.5: COD UDLØB FRA MELLEMKLARING OG COD FJERNELSE OVER FORBEHANDLINGSTRINNET MED UDTAG AF PRIMÆRSLAM.

I Tabel 5.1 nedenfor er de ovenstående figurer suppleret med data registreret testperioden med angivelse af middelværdi og standardafvigelse.

Tabel 5.1: Driftsdata ved forskellig kemikaliedosering.						
FeSO ₄ [kg/d]	Flow [m ³ /d]	Belastning [PE]	COD _{ind} MK [mg/l]	COD _{ud} MK [mg/l]	COD-fjernelse [%]	Tørstof primærslam [%]
100	9.250 ±4.050	121.600 ±33.350	1.586 ±256	538 ±122	68 ±3,5	-
120	7.760 ±2.270	108.700 ±20.300	1.600 ±280	490 ±75	71 ±4	1,1 ±0,2
120 ⁽¹⁾	9.950 ±3.160	122.400 ±30.600	1.513 ±356	345 ±80	77 ±2	1,2 ±0,2
235	6.625 ±1.620	101.400 ±19.700	1.714 ±232	553 ±57	67 ±4,5	1,1 ±0,2

I testperioden er der gennemført daglige målinger af flow og tørstofindhold i udtaget primærslam. Tabellen angiver middelværdi og standardafvigelse. Note (1) indikerer reduceret returslamføring fra 250 til 150 m³/d. Datagrundlaget baseret på 36 indløbsmålinger af COD samt 41 udløbsmålinger fra mellemklaringstankene målt som tidsproportionale døgnprøver. Det er derfor vigtigt at understrege, at følgende nedenstående vurderinger er baseret på et forholdsvist spinkelt datagrundlag statistisk set. Derudover er returslamføringen mellem biosorptionstrin og mellemklaringstanke ændret d. 5. september. August og september har ligeledes været præget af kraftige regnhændelser, der i en periode har givet tyndt spildevand. Endelig varierer indløbsbelastningen gennem testperioden. Der er således flere betydende parametre, der spiller ind i forbindelse med driften af biosorptionstrinnet og mellemklaringstankene, der i dette projekt ikke har været mulig at se isoleret på. Vurderingerne er således baseret på summen af parametrenes påvirkning af driften.

Det har ikke været muligt at bearbejde data vedr. mængder indpumpet primærslam og biologisk overskudsslam samt gasproduktion, idet udtaget af biologisk overskudsslam har varieret meget i testperioden. På baggrund af data vist i Tabel 5.2 vurderes det, at der opnås en bedre COD-fjernelse ved dosering af 120 kg FeSO₄/d end ved 100 kg FeSO₄/d. Derimod har det ikke haft noget effekt på COD fjernelsen eller tørstofindholdet i det udtagne primærslam at øge kemikaliedoseringen til det dobbelte (235 kg FeSO₄/d).

Tabel 5.2: Gennemsnitlige udtag af primærslam ved forskellige kemikaliedoseringer og returslamføring mellem biosorptionstrin og mellemklaringstanke.	
(1) reduceret returslamføring fra 250 til 150 m ³ /d.	
FeSO ₄ [kg/d]	Primærslam udtaget [kg/d]
100	Ikke registreret
120	5.620
120 ⁽¹⁾	6.410
235	5.740

På baggrund heraf konkluderes, at biosorptions- og mellemklaringstrinnet reduktionspotentialet udnyttes fuldt ud. En dosering på 120 kg FeSO₄/d virker umiddelbart til at være den bedste dosering af de 3 testede. En sænkning af returslamføringen mellem biosorptionstrinnet og mellemklaringstankene vurderes ligeledes at have en gavnlig effekt på COD fjernelsen, idet rensegraden stiger ca. 6 procentpoint. Ved sænket returslamføring og dosering af 120 kg FeSO₄/d er der ikke en signifikant stigning i tørstofniveauet i det udtagne primærslam. Der er gennem hele perioden foretaget stikprøvemålinger med slamspejlsmåler i begge mellemklaringstanke. Grundet høje svovlbrintekonzentrationer i tanken, har det kun været mulig at måle i tankens periferi. Her har slamspejlet ligget konstant midt i mellemklaringstankene på ca. 2,5 meter i hele testperioden. Dette underbygger at tørstofindholdet i det udtagne primærslam har ligget på et konstant niveau gennem testperioden. Da udtaget af primærslam mængdemæssigt vil være belastningsrelateret er det vanskeligt at konkludere noget entydigt ud af de forskellige driftssituationer.

Referencer

Cho, J. H. , Sung, S.W. og Lee, I.B., 2002. Cascade control strategy for external carbon dosage in predenitrifying process. *Water Science and Technology* Vol 45 (2002) No 4-5 pp 53-60.

Rojas, J. D., Flores-Alsina, X., Jeppsson, U. og Vilanova, R., 2012. Application of multivariate virtual reference feedback tuning for wastewater treatment plant control. *Control Engineering Practice* 20 (2012) 499-510.

STOWA, 2010. NEWS: The Dutch roadmap for the WWTP of 2030

Vilanova, R., Katebi, R. og Wahab, N., 2011. N-Removal on Wastewater Treatment Plants: A Process Control Approach. *Journal of Water Resource and Protection*, 2011,3,1-11

Yong, M., Yongzhen, P. og Jeppsson, U., 2006. Dynamic evaluation of integrated control strategies for enhanced nitrogen removal in activated sludge processes. *Control Engineering Practice* 14 (2006) 1269-1278.

Supplerende litteratur

Andreasen, P., 1992. Forfældning af spildevand ved kvælstoffjernelse. *Spildevandsforskning fra Miljøstyrelsen*. Nr. 46 1992.

Fernández, F.J., et al, 2011. Agro-food wastewater as external carbon source to enhance biological phosphorus removal. *Chemical Engineering Journal* 166. 559-567. 2011.

Flores-Alsina, X., Rodriguez-Roda, I., Sin, G. og Gernaey, K.V, 2008. Multi-criteria evaluation of wastewater treatment plant strategies under uncertainty.

Hallin, S. et al, 1996. Microbial adaption, process performance and suggested control strategy in a pre-denitrifying system with ethanol dosage. *Water Science and Technology*. Vol 34 (1996) No. 1-2 pp 91-99.

Johnson B. og Fergusin, L., 2005. Advanced Clarification Basics. *Water Environment & Technology*, December 2005.

McCue, T.M., Randall, A. A. og Eremektar, F. G., 2006. Contrasting the benefits of primary Clarification versus fermentation in advanced sludge biological nutrient removal system. *Journal of Environmental Engineering*.

Puig, S. et al, 2010. The effect of primary sedimentation on full-scale WWTP nutrient removal performance. *Water Research*. Nr. 44, 2010.

Rieger, L. Takács, I. og Siegrist, H., 2012. Improving Nutrient Removal While Reducing Energy Use at Three Swiss WWTPs Using Advanced Control. *Water Environment Research*. Volume 84, Number 2, 2012.

Ruano, M.V., Ribes, J., Seco, A. og Ferrer, J., 2011. DSC: Software tool for simulation-based design of control strategies applied to wastewater treatment plants.

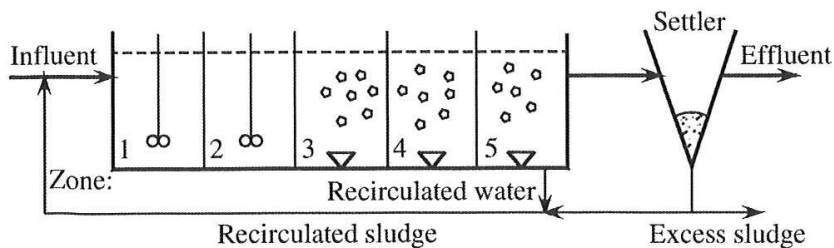
Scuras, S., Energy saving aeration control for nutrient removal.

Steffens, M. A og Lant, P. A, 1999. Multivariable control of nutrient-removing activated sludge systems. Water Research. Vol. 33, No. 12 pp. 2864-2878. 1999.

Sweeney, M. og Kabouris, J., 2009. Modeling, Instrumentation, Automation and Optimization of wastewater treatment facilities. Water Environment Research.

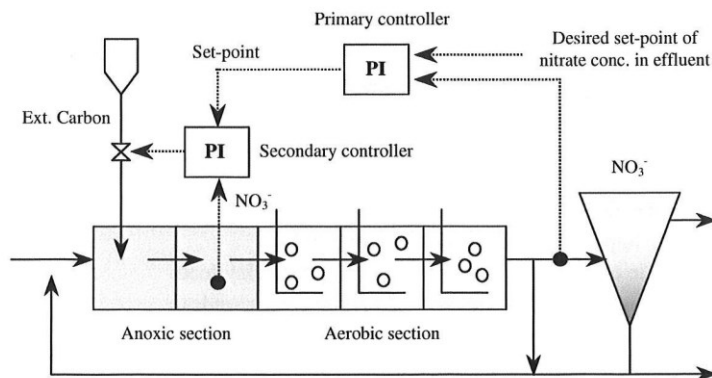
Bilag 1: Styring af kulstofdosering

Der er igennem tiderne foreslået forskellige styringsstrategier for kulstofdosering, men det kan være svært at sammenligne resultaterne på grund af, at der benyttes forskellige indløbskoncentrationer, forskellige anlægsopbygninger osv. For at understøtte udviklingen af forskellige innovative styringsstrategier er der i 2002 udviklet en "Benchmarking model" for simulering af aktivslamprocesser, se Figur 1. Benchmarking modellen definerer en anlægsopbygning, spildevandskarakteristik af indløbsflow, modelparametre, testprocedurer og evalueringskriterier, således at det er muligt at sammenligne effekten af forskellige styringsstrategier [Yong, 2006].



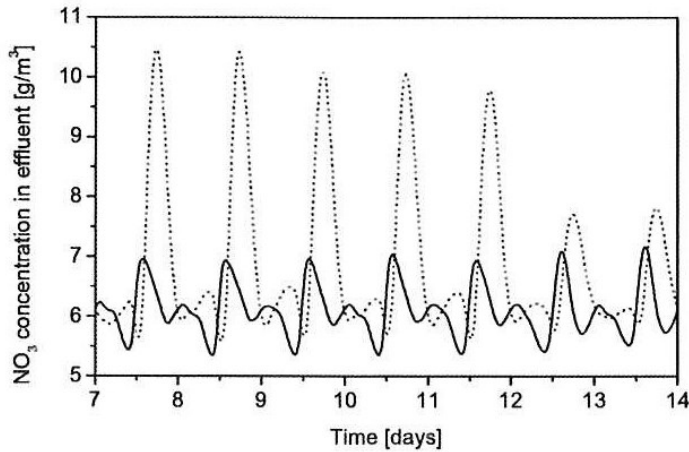
FIGUR 1: ANLÆGSOPBYGNING I BENCHMARK MODEL [YONG, 2006].

Det er karakteristisk, at denne benchmarking model benyttes til sammenligning i den publicerede litteratur fra 2002 og frem, og er blevet benyttet i samtlige af de nedenfor nævnte publikationer. I 2002 foreslog Cho et al. implementering af en kontrolstrategi bestående af 2 PI-regulatorer for regulering af nitratkoncentrationen i denitrifikationsprocessen ved regulering af den eksterne kulstofdosering.



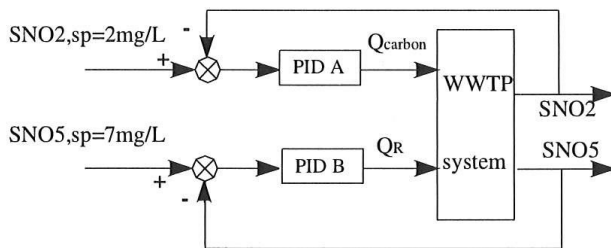
FIGUR 2: KONTROLSTRATEGI BESKREVET I [CHO, 2002].

Ved en kaskade-kontrol, illustreret i Figur 2, reguleres kulstofdoseringen ud fra nitratkoncentrationen i den sidste anoxiske tank og nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Målet med styringen er at holde en mere stabil koncentration i udløbet og hurtigere at kunne reagere på udsving i belastningen. Af Figur 3 fremgår det, hvorledes udsvingene i nitratkoncentrationen i udløbet reduceres ved implementering af den forbedrede styring.



FIGUR 3: ILLUSTRATION AF NITRATKONCENTRATIONEN I UDLØBET VED FORBEDRET KONTROLSTRATEGI BESKREVET I [CHO, 2002].

Yong et al. beskrev i 2006, 6 forskellige styringsstrategier for nitrat-recirkulation og kulstofdosering. Styringsstrategi (a) består af 2 "uafhængige" feedback stylinger PID A og PID B.

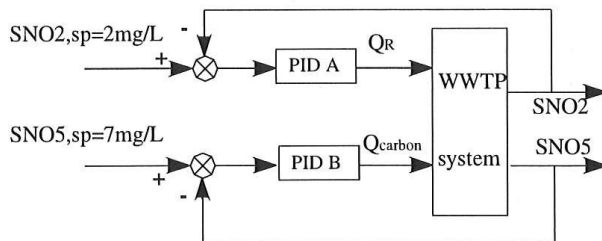


(a)

FIGUR 4A: STYRINGSSTRATEGI (A) BESKREVET I [YONG, 2006].

- Styringen PID A styrer kulstofdoseringen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt.
- Styringen PID B styrer nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Setpunktet for nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene er et fast setpunkt.

Styringsstrategi (b) består ligeledes af 2 "uafhængige" feedback stylinger PID A og PID B.

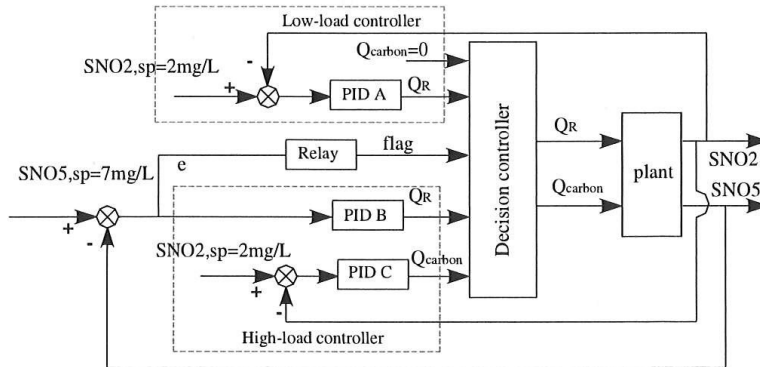


(b)

FIGUR 4B: STYRINGSSTRATEGI (B) BESKREVET I [YONG, 2006].

- Styringen PID A styrer nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt.
- Styringen PID B styrer kulstofdoseringen ud fra nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Setpunktet for nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene er et fast setpunkt.

Styringsstrategi (c) består af 3 feedback styringer (PID A, PID B og PID C), der er indbyrdes afhængige. Der slukkes for kulstofdoseringen i lav belastningsperioder:

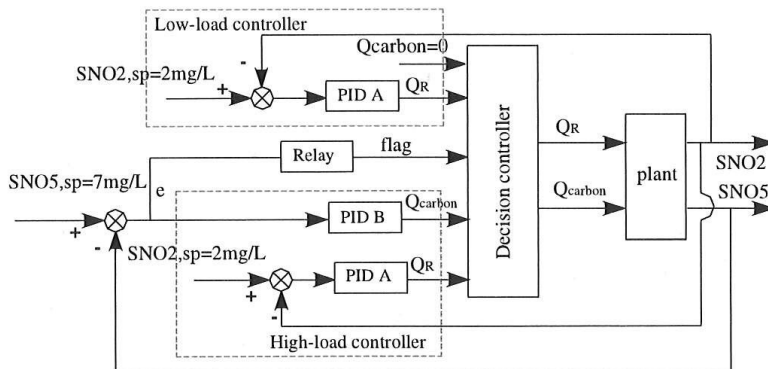


(c)

FIGUR 4C: STYRINGSSTRATEGI (C) BESKREVET I [YONG, 2006].

- Styringen PID A styrer nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt. Denne styring benyttes kun ved lav belastning, hvor der ikke doseres kulstof (PID C benyttes ikke). Når PID B benyttes er PID A slukket og omvendt.
- Styringen PID B styrer nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Setpunktet for nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene er et fast setpunkt. Denne styring aktiveres (og PID A deaktiveres) når nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene overstiger setpunktet.
- Styringen PIDC styrer kulstofdoseringen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt.

Styringsstrategi (d) består af 2 "uafhængige" feedback styringer (PID A og PID B), dog slukkes kulstofdoseringen i lav belastningsperioder:

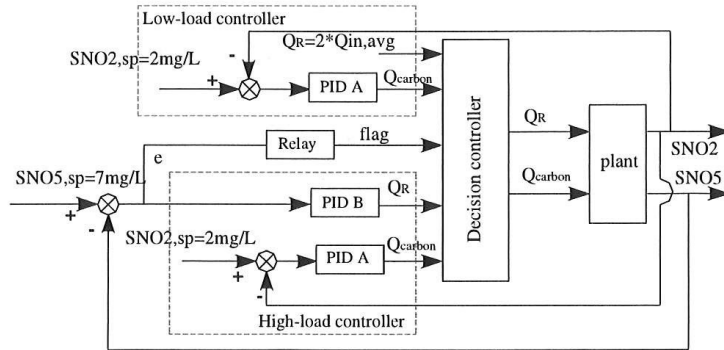


(d)

FIGUR 4D: STYRINGSSTRATEGI (D) BESKREVET I [YONG, 2006].

- Styringen PID A styrer nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt.
- Styringen PID B styrer kulstofdoseringen ud fra nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Setpunktet for nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene er et fast setpunkt. I lav belastningsperioder slukkes der for styring PID B, for at spare på kulstof.

Styringsstrategi (e) består ligeledes af 2 "uafhængige" feedback styre (PID A og PID B), ved lav belastning er nitrat-recirkulationen fastholdt til 2 x indløbsflow:

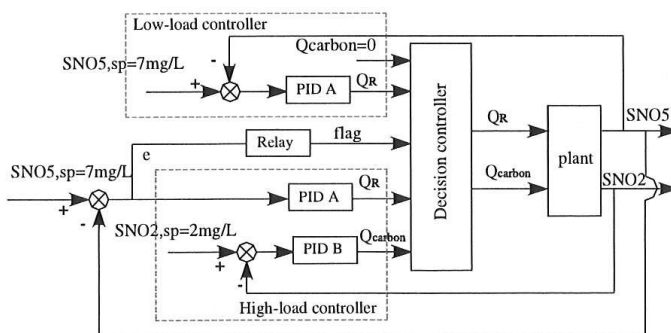


(e)

FIGUR 4E: STYRINGSSTRATEGI (E) BESKREVET I [YONG, 2006].

- Styringen PID A styrer kulstofdoseringen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt. I lav belastningsperioder er nitrat-recirkulationen ved denne styring fastholdt på 2 x indløbsflow.
- Ved høj belastning styrer PID B nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Setpunktet for nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene er et fast setpunkt. PID B benyttes når nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene overstiger setpunktet.

Styringsstrategi (f) består ligeledes af 2 "uafhængige" feedback styre (PID A og PID B), dog slukkes kulstofdoseringen i lav belastningsperioder:



(f)

FIGUR 4F: STYRINGSSTRATEGI (F) BESKREVET I [YONG, 2006].

- Styringen PID A styrer nitrat-recirkulationen ud fra nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene. Setpunktet for nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene er et fast setpunkt.

- Styringen PID B styrer kulstofdoseringsen ud fra nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank. Setpunktet for nitratkoncentrationen i den 2. anoxiske tank er et fast setpunkt. PID B benyttes når nitratkoncentrationen i udløbet fra procestankene overstiger et setpunktet.

Styringsstrategi (a) præsterer samlet set de bedste resultater ud fra de kriterier der er opstillet af benchmarkgruppen [Yong, 2006].

I 2011 beskrev Vilanova et al. en kaskade-kontrol med en forvarslings-regulator, hvor iltsetpunktet styres ud fra nitratkoncentrationen i den anden anoxiske tank samt ammoniumkoncentrationen i indløbstanken. Senest i 2012 har Rojas et al. beskrevet effekten af implementering af en styringsstrategi kaldet "Virtuel Reference Feedback Tuning" med multiple input og multiple output. Hvor data bliver behandlet matematisk og den indbyrdes påvirkning af de forskellige kontrol-loops bliver indarbejdet.

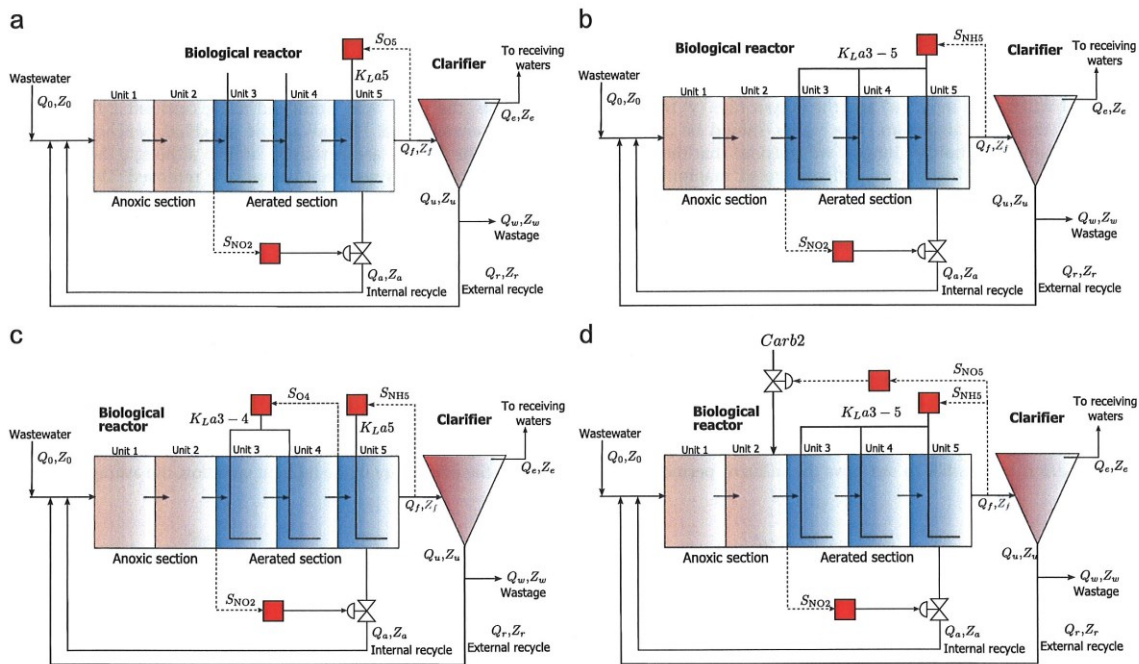


Fig. 4. Different control strategies tested with the BSM1. (a) A0, (b) A1, (c) A2, (d) A3.

FIGUR 5: FORSKELLIGE KONTROLSTRATEGIER BESKREVET I [ROJAS, 2012].

Ved sammenligning af de forskellige kontrolstrategier fremgår det, at kontrolstrategien (strategi d i Figur 5, hvor kulstofdoseringsen blev styret af nitratkoncentrationen i den sidste tank, gav op til 30 % lavere kvælstofniveau i udledningen end f.eks. kontrolstrategi (a) i Figur 5, hvor der ikke er kulstofdoseringsen [Rojas, 2012].

Ved behandling af emnet kulstofdoseringsen, er det typisk forudsat, at spildevandet har et lavt C/N-forhold, og der således er brug for en ekstern kulstofkilde. I sammenligningen af de forskellige metoder er der i tråd med anbefalingerne fra Benchmarking modellen, generelt indkalkuleret omkostninger til køb af eksternt kulstof, hvorfor de anbefalede metoder ikke nødvendigvis er de metoder, der kan rense spildevandet mest effektivt, idet der hele tiden er en opvejning af de tilhørende omkostninger. I forbindelse med igangværende store projekter om energioptimering, etablering af energineutrale eller endda energiproducerende renselanlæg anføres det typisk, at primærtrinene på renselanlæggene skal indrettes og styres således, at der fjernes så meget organisk stof som muligt i primærtrinnet under hensyntagen til at C/N-forholdet i aktiv-slamslamanlægget ikke må blive for lavt [STOWA, 2010]. Det har dog endnu ikke været muligt at finde publiceret materiale, om hvorledes denne optimering af kulstofdoseringsen kan gennemføres.

Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renseanlæg

Del 1 – Optimeret forbehandling



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

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

www.nst.dk