

Energieffektiv måling og regulering af dekantere



Resume

Det gennemførte EUDP projekt vedrører udvikling, test og implementering af en forbedret måleteknik og en avanceret reguleringsteknik med henblik på en mere energieffektiv styring af en dekantere til spildevandsbehandling på renseanlæg. Reduktionen af energiforbruget er en følge af

- en mere stabil proces, specielt en mindre variation i moment
- en bedre og mere ensartet separation af tørstof og vand, og hermed generelt
- et større tørstof i slamkagen under samme krav til udgående vandkvalitet (recovery).

Udfordringen er delvist løst gennem

- etablering af vibrationsmålinger i begge ender af dekanteren,
- udvikling og test af en analysemetode, der fra disse målinger afslører den kritiske position af slamkagen,
- udvikling og test af en mere processtabil reguleringsteknologi samt
- etablering af betjeningsvenlige regulator- og kommunikationsenheder.

Med den nye regulering er foreløbigt opnået følgende resultater:

- De ofte store udsving i moment er reduceret ca. 30 %.
- For sammenhængen mellem tørstof i slamkage og reject kvalitet er der foretaget prøveudtag med ½ times mellemrum. Disse målinger viser generelt at vandkvaliteten (recovery) ved samme tørstof i slamkagen er forbedret med $0,7 \pm 0,3$ %.
- Det svarer til at tørstof ved samme vandkvalitet (recovery) kan øges med $0,4 \pm 0,2$ %.
- For hver dekanter med en årlig slamproduktion på 10.000 ton giver det en potentiel besparelse på ca. 100.000 kr./år, en energibesparelse på 120 MWh/år, og en CO₂ reduktion på ca. 80 ton/år.

26-03-2014

J.nr. 64011-0301



3 / 23

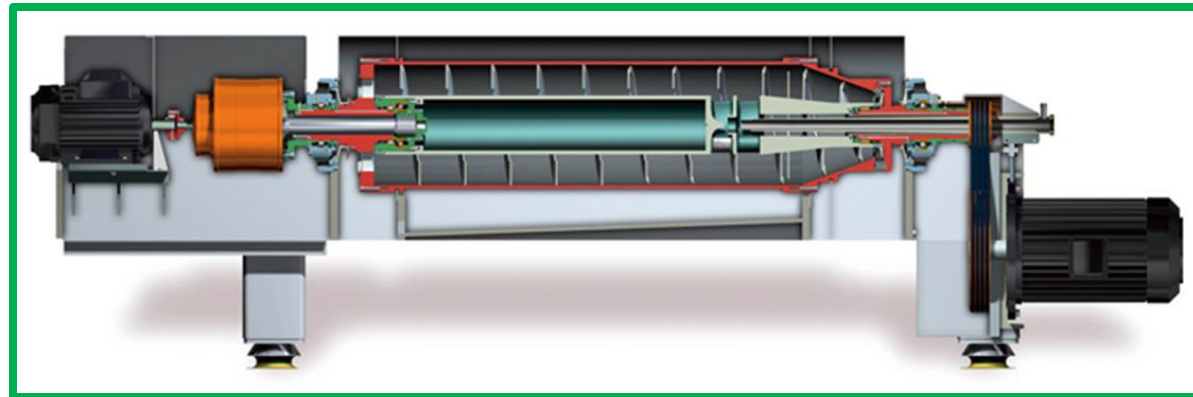
Indholdsfortegnelse

Resume	2
Indholdsfortegnelse	3
Udfordringen	4
Løsningen	7
Resultater	9
Måleteknik og analyse	11
Adaptiv regulering	14
Modeludvikling	23

Udfordringen

Dekanteren anvendes på renseanlæg til afvanding af overskudsslam. Separation af tørstof og vand sørger dekanterkuglen for, idet denne roterer meget hurtigt, f.eks. 3600 rpm, hvorved tørstof i høj grad koncentrerer ude ved kuglen mens vand løber længere inde, hvorfor også vandudløbet foregår tæt ved kuglecentret. Dekanterens transportør, der bevæger sig i forhold til dekanterkuglen med en differentiell hastighed, der typisk er 1 -2 rpm, sørger for at tørstoffet transporteres ud. Jo mindre den differentielle hastighed bliver, desto mere tørstof kommer der i dekanteren og jo større bliver momentet.

Det rensede vand (recovery) føres tilbage til renseanlægget, mens slamkagen transporteres væk. Denne bortskaffelse af slamkagen er ofte forbundet med store omkostninger – typisk 100 € / ton – så selv små forbedringer af slamkagens tørstofprocent kan give større besparelser. Reduktion af vandindholdet betyder mindre energi og CO₂ udledning i forbindelse med den efterfølgende transport og afbrænding.



Figur 1. Dekanteren set i tværsnit.

Det indgående flow har typisk en tørstofprocent på 2-3 %. Indgående flow hastighed kan f.eks. være 10-20 m³/h. Polymer med en given koncentration tilsættes med en hastighed, der hovedsageligt er proportional med flow hastigheden. Tørstofprocenten af den udgående slamkage er typisk 20 – 30 %. Ved højere moment bliver slamkagens tørstof procent større – indtil en vis grænse.

Dekanteren styres gerne ved at den differentielle hastighed reguleres således, at momentet holdes på et givet sætpunkt. Sætpunktet vælges højt, så slamkagens tørstof procent bliver høj, men ikke så højt, så væsentlig tørstof følger med rejectet ud. En typisk kvalitetsgrænse er, at højst 5 % af tørstoffet må følge med vandet ud (recovery > 95 %). 95 % recovery betyder nemlig 5 % øget produktionstid, da 5 % af tørstoffet så igen skal igennem renseanlæg og dekanter.

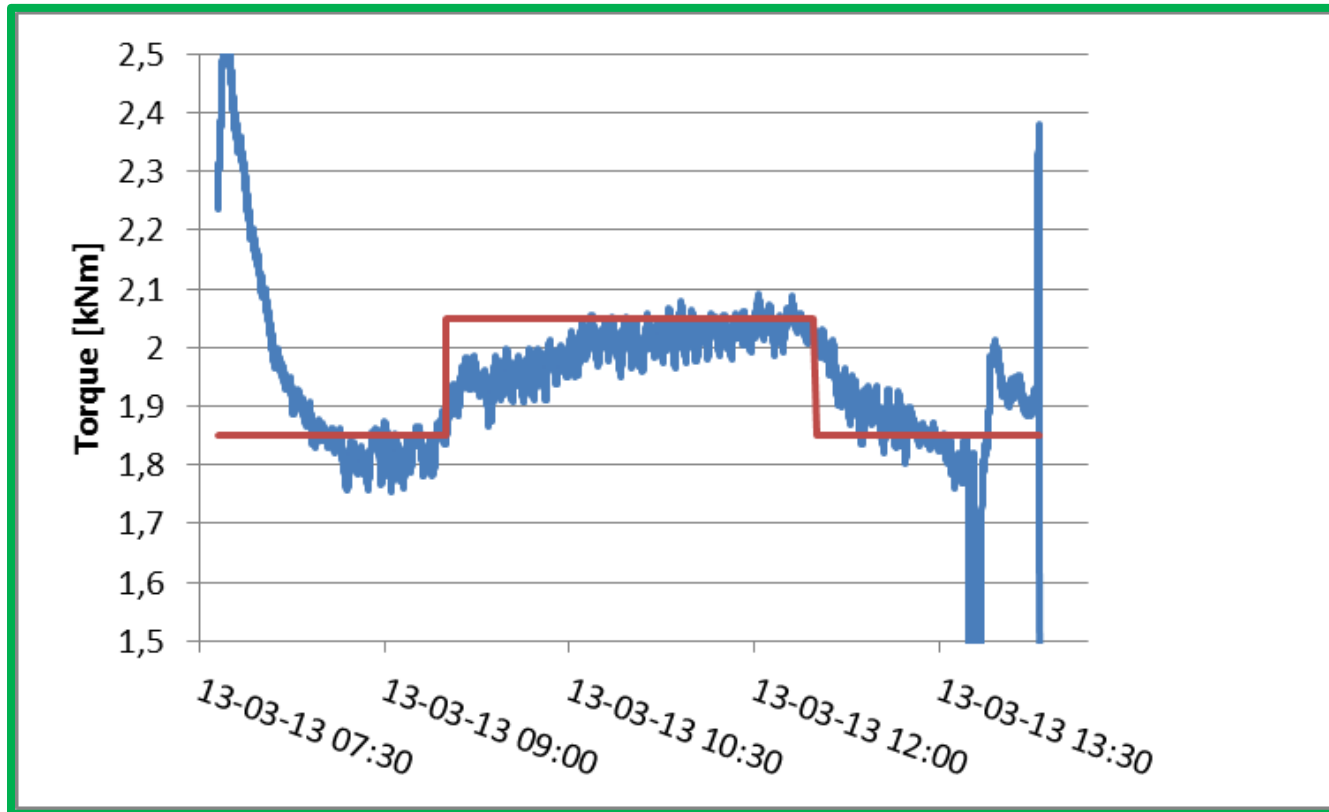
Dekanteren bliver på de testede renseanlæg reguleret enten efter Alfa Laval's DCC eller nyere 2-Touch regulering.

Variationerne i moment og differentiell hastighed under denne styring kan være markante, idet både indgående tørstof og flow varierer, og der er således behov for en styring, der i højere grad tilpasser sig variationer i driftsbetingelserne. Det er særligt tydeligt, når driftsbetingelserne ændres markant, f.eks. ved flytning af moment sætpunkt til en højere værdi med henblik på at nå et højere tørstof.

For store variationer kan betyde en dårligere separation, hvor tørstoffet i slamkagen bliver lavere og tørstoffet i vandet bliver højere end ved optimal drift. Som konsekvens heraf reduceres kapaciteten (mere gen-produktion) og efterfølgende transport- og energiomkostninger forøges (mere slamkage).

Udfordringen var således at forbedre styringen af dekanteren med henblik på at opnå

- en mere stabil proces, specielt en mindre variation i moment,
- en bedre og mere ensartet separation af tørstof og hermed
 - o et generelt større tørstof i slamkagen under samme krav til recovery, og
 - o et efterfølgende reduceret energiforbrug.



Figur 2. Eksisterende 2-Touch regulering ved renselanlægget i Århus - Egå.
Langsom indkøring mod sætpunkt og markante udsving i moment.

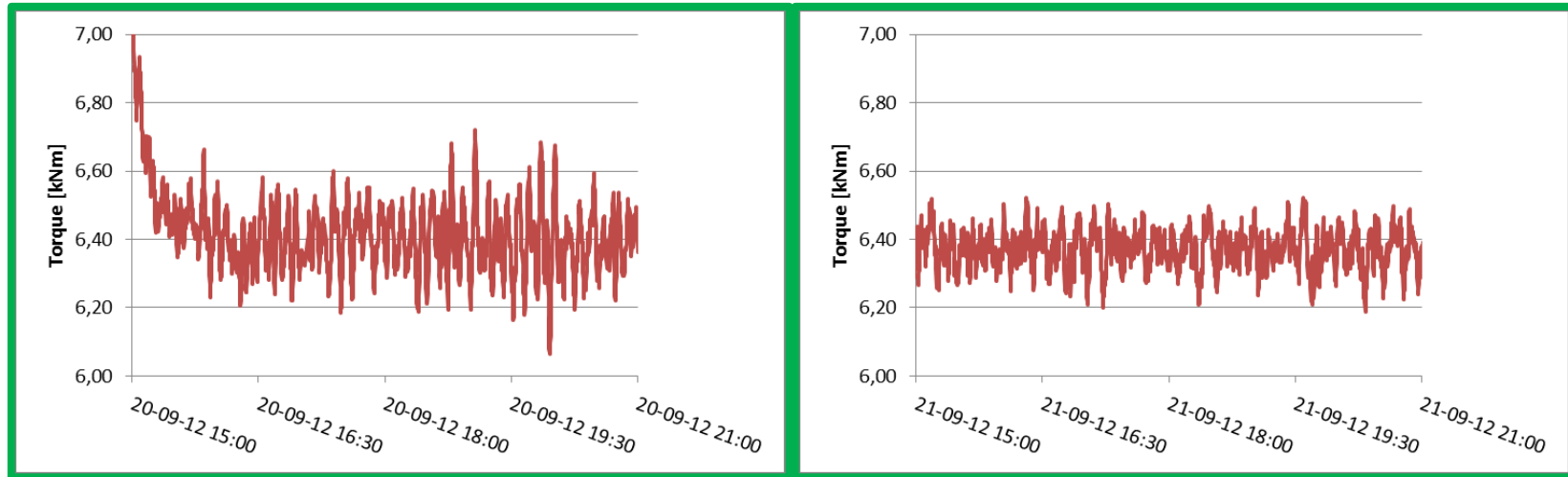
Løsningen

Med henblik på at skabe et mere stabilt moment, og som følge heraf en mere ensartet kvalitet og generelt bedre produktionsforhold, er en ny måleteknik og dekanterregulering introduceret. Den ny regulering er baseret på

- vibrationsmålinger og analyse heraf, der identificerer kritiske positioner for slamkagen i dekanteren og dermed det kritiske moment,
- en data-drevet dekantermodel, der ud fra opsamlede data forudsiger procesforløbet,
- en reguleringsmodul, der ud fra modelforudsigelser af processen vælger den optimale justering af den differentielle hastighed med henblik på at fastholde momentet tæt ved men under sit kritiske niveau, og
- en parametertilpasning, der ud fra målte variationsniveauer og tidsskalaer løbende optimerer den anvendte model med henblik på optimal tilpasning til de konkrete driftsbetingelser.

Der er etableret 2 regulator bokse, den ene beregnet for tilkobling til skab med DCC, den anden beregnet for tilkobling til 2-Touch. Separate tilkoblingsdokumenter er udarbejdet for begge bokse. Endvidere foreligger separat dokument over omstillingsproceduren fra eksisterende regulering til den adaptive regulering.

Specielt den adaptive parametertilpasning sørger i modsætning til de eksisterende regulatorer for, at reguleringsmodellen løbende tilpasses procesforholdene. Herunder sker der ikke mindst en løbende optimering af den tidsskala regulatoren agerer på, således at den hverken er for langsom og dermed ikke reagerer rettidigt eller for hurtig med ustabil drift til følge.



Figur 3. Eksempel på moment variation med eksisterende 2-Touch regulering (tv.) og ny adaptiv regulering (th.).

Resultater

En række test er foretaget ved forskellige renseanlæg, med forskellige værdier for feed flow, indgående tørstof, moment sætpunkt og tørstof af slamkage. Den eksisterende styring har været såvel DCC regulering som 2-Touch, og nye testbokse og opkoblingsprocedurer er i begge tilfælde blevet udviklet og etableret med den ny styring. Endvidere er en række prøver er taget med ½ times mellemrum med henblik på at måle recovery og slamkagens tørstof samt indgående tørstof.

Testene har været særdeles vigtige for udviklingen af måle- og analyseteknikker, for udviklingen af nye dekantermodeller, og for udviklingen af nye adaptive regulatorer.

De væsentligste resultater opsummeres nedenfor. Som det vil fremgå er generelt følgende opnået:

- en mindre variation – reduktion ca. 30 %, samt
- en generel forbedring af vandkvaliteten (recovery) ved samme tørstof i slamkagen på $0,7 \pm 0,3$ %, svarende til et øget tørstof ved samme recovery på $0,4 \pm 0,2$ %.

En overordnet gennemgang findes i bilag "EUDP Præsentation".

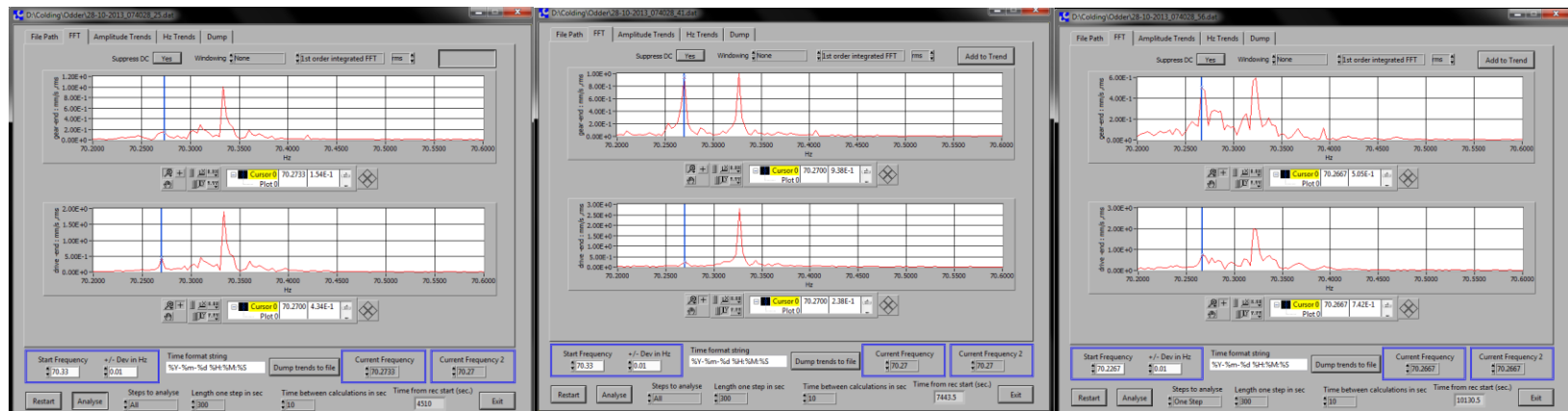


Figur 4. Tv.: Prøver af feed, slamkage og reject (vandudløb) blev efter de indledende testperioder udtaget med ½ times mellemrum. Tørstofindhold blev bestemt ved vejning før/efter tørring.

Måleteknik og analyse

En del forskellige målemetoder blev undersøgt, og flere bliver anvendt i arbejdet fremover. Den valgte teknik til dette projekt blev dog vibrationsmålinger i begge ender af dekanteren. Vibrationsamplitude og -frekvens for både rotor (kugle) og transportøren blev målt i hhv. "gear end" (væskeudløb) og "drive end" (tørstof udløb). Målemetode og signalanalyse er gennemgået i bilag "Vibrationsmåling og analyse Aalborg" med eksempler fra renseanlægget Ålborg Vest.

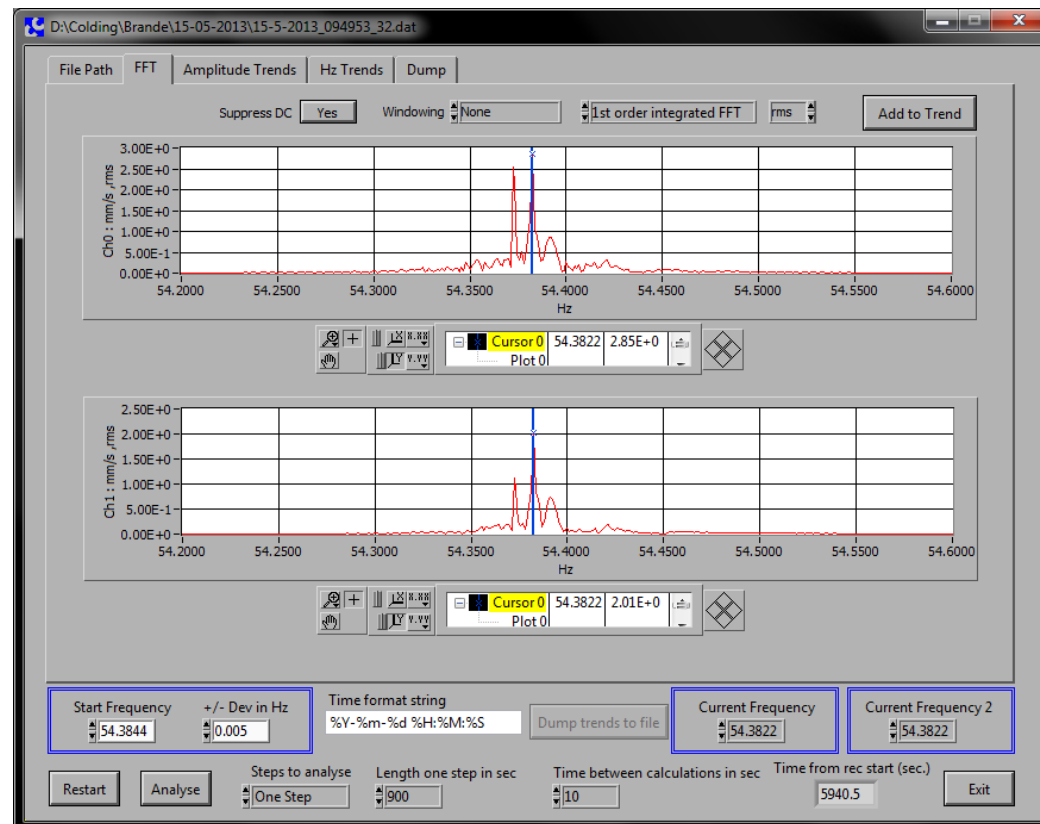
Det anvendte analysesystem viste klart udviklingen i spektret, resonanstoppe for rotorkugle og transportør kunne adskilles, selvom disse ligger tæt i frekvens. Eksempler fra renseanlægget i Odder er vist her nedenfor.



Figur 5. Eksempler på identifikation af vibrationsamplituder.

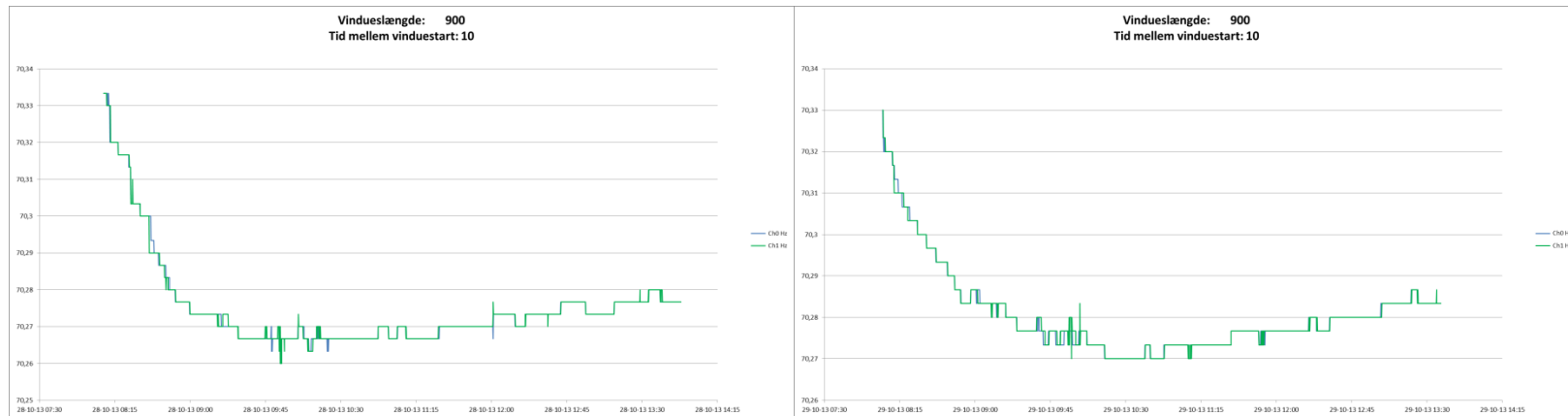
Analyserne viste, at der var særlige forhold, der viste sig i vibrationspektrene tæt ved overgangen fra accepteret til ikke accepteret recovery. Ved renseanlægget i Brande var denne effekt forstærket. Dekanterens evne til at holde den ønskede differentielle hastighed mellem rotor og transportør blev her også verificeret, selvom rotorfrekvensen i en periode flyttede sig markant i forhold hertil.

Dette kan bl.a. ses i bilag ”Brande præsentation”. Forholdet mellem transportørens vibrationsamplituder i de to ender af dekanteren viste et interessant forløb, med særlig styrke tæt ved det kritiske moment. Her blev også håndtering af (sjældne) tre-toppe diskuteret.



Figur 6. Et eksempel på identifikation af tre vibrationsamplituder.

Den mest detaljerede analyse af forløbet af forholdet mellem transportørens vibrationsamplituder blev foretaget ved renselanlægget i Odder, hvor også frekvensstabiliteten af den differentielle hastighed blev undersøgt.



Figur 7. Selvom frekvensen af rotoren kan flytte sig mere end 1 rpm (0,017 Hz), flytter transportørfrekvensen sig samtidig, således at den differentielle hastighed fastholdes med en meget høj nøjagtighed.

Gentagelse af test viste en meget stor grad af reproducerbarhed, og har nu givet anledning til at yderligere test vil foretages på øvrige renselanlæg med henblik på efterfølgende kommerialisering. Resultaterne fra Odder kan ses i bilag "Odder vibrationsdata".

Adaptiv regulering

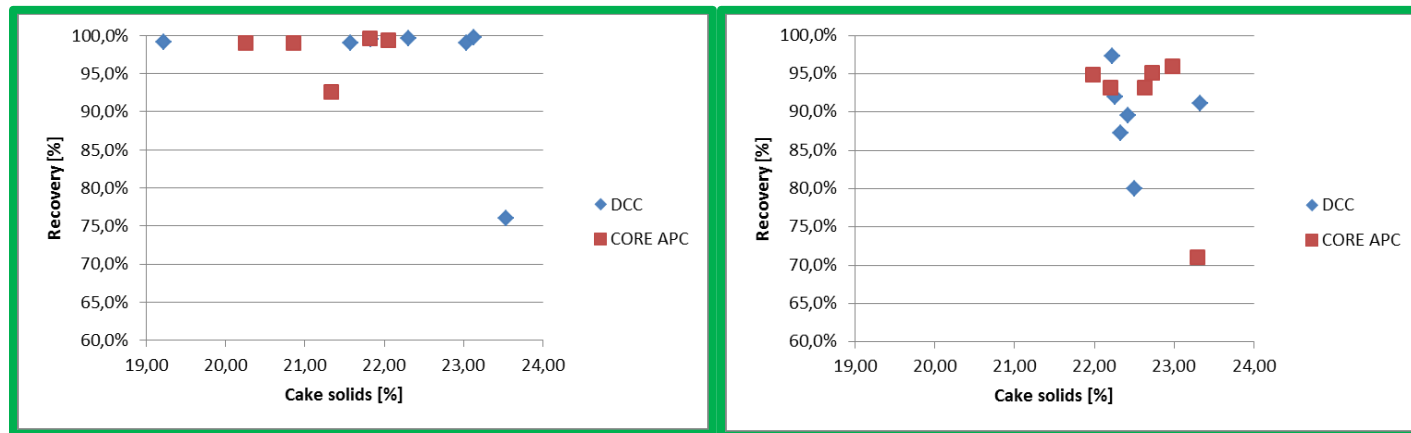
Efter en række programtest blev en adaptiv dekanter regulering testet i Århus for at undersøge muligheden for en reduktion i momentvariationen. Testforløb blev iværksat med ½ times prøveudtag med henblik på at måle recovery og slamkagens tørstofprocent og sammenligne resultater fra en adaptiv styring med resultaterne for den eksisterende DCC regulering.



Figur 8. Renseanlæg ved Århus Vand, Viby.

Første testforløb var den 6.-7.3.2012, men tiden blev her primært anvendt på korrekt opkobling og omstilling mellem regulatorerne.

I stedet blev ny test foretaget den 21.-22.3.2012. Feed flow var begge dage $10 \text{ m}^3/\text{h}$, indgående tørstof var 3,14 %. Den 21.3.2012 blev moment sætpunkt sat på 6,0 kNm; mens moment sætpunktet dagen efter den 22.3.2012 blev sat på 6,3 kNm. I det kritiske tørstof område mellem 22 % og 23 % ligger den gennemsnitlige recovery 4,4 % højere ved brug af en adaptiv regulering.



Figur 9. Testresultater fra den 21.3. (tv. - moment sætpunkt = 6,0 kNm) og fra den 22.3.2012 (th. - moment sætpunktet = 6,3 kNm).

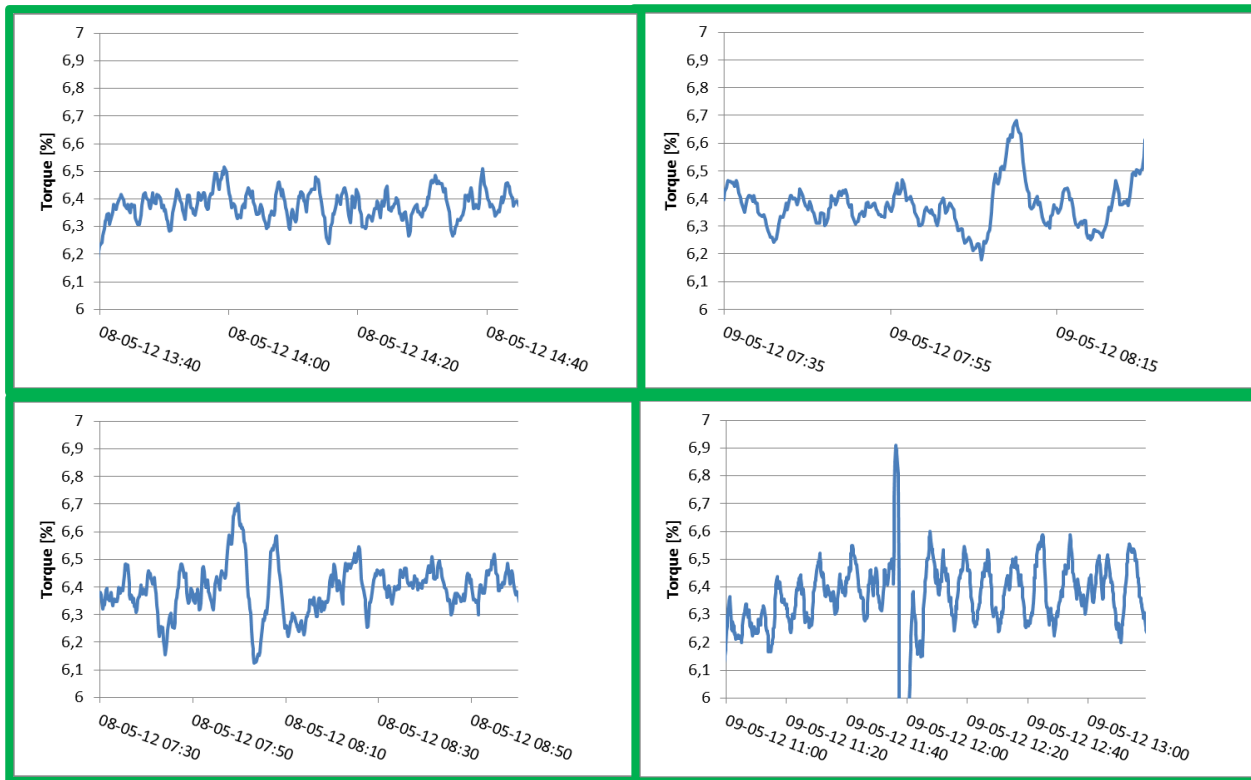
Næste sæt af reguleringstest blev udført ved renseanlægget Ålborg Vest. Indkøring blev foretaget den 2.-3.5. og egentlige test den 8.-9.5.2012, hvor der blev skiftet mellem den adaptive styring og den eksisterende DCC regulator.

Indgående tørstof var 3,16 %. Moment sætpunktet blev fastholdt på 6,4 kNm. Feed flow sætpunkt blev skiftet mellem 19 og 23 m³/h. Prøver blev taget hver ½ time.

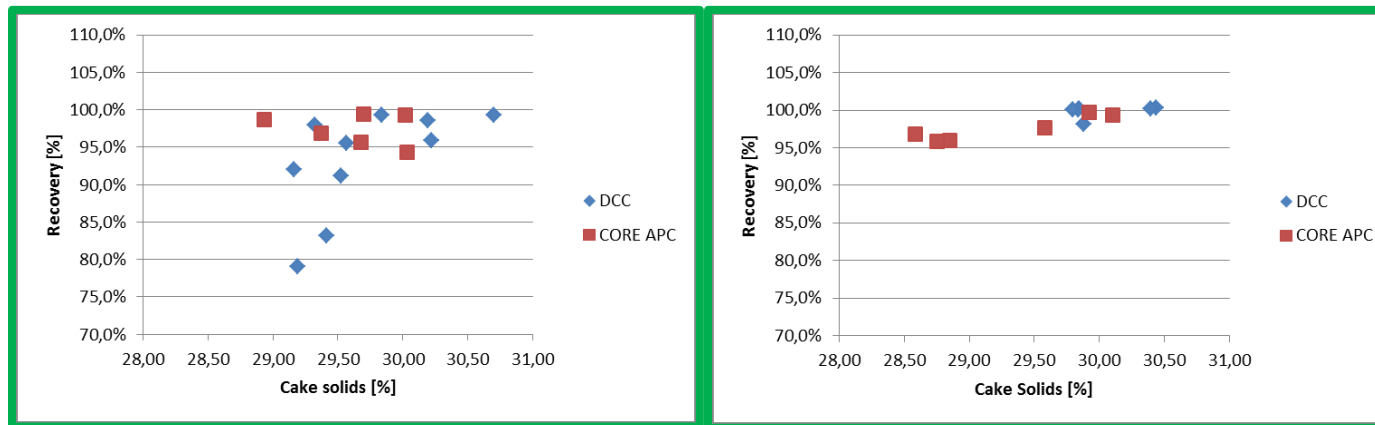
Fig. 10 viser variationen i momentet ved et feed flow på 19 m³/h. Forskellen i momentvariationen for adaptiv regulering (øverst) og DCC regulering (nederst) er tydelig. Standardafvigelsen findes til:

- 0,07 kNm for adaptiv regulering;
- 0,11 kNm for DCC regulering.

Ved brug af adaptiv regulering er variationen således reduceret 37 %.



Figur 10. Variation i momentet ved et feed flow på 19 m³/h. Øverst for den adaptive regulering, nederst for DCC reguleringen. Forskellen i momentvariationen er tydelig.



Figur 11. Recovery vs. tørstof 8.5.2012 (tv.) og 9.5.2012 (th.). Lav recovery / lavt tørstof er forbundet med øget flow fra 19 til 23 m³/h.

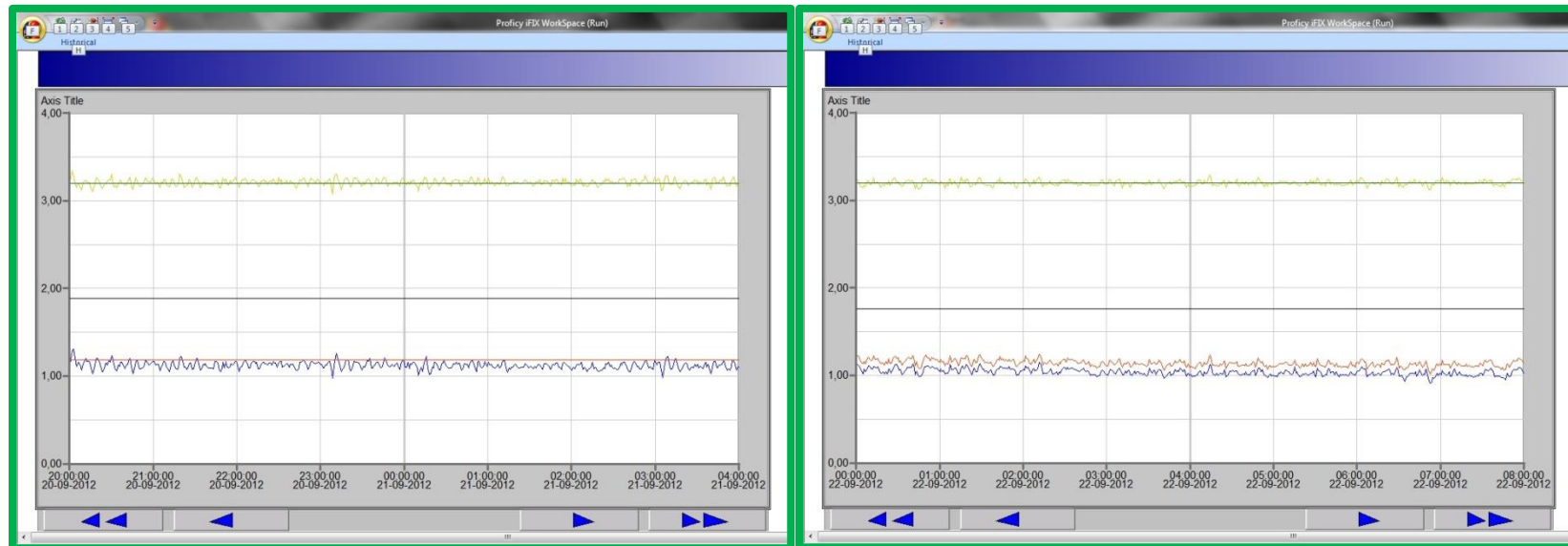
Yderligere test blev foretaget den 19.-25.9.2012. Efter opstart den 19.5. blev test forløb foretaget ved konstant feed flow, 18 m³/h, den 20.5. (adaptiv regulering) og den 21.5. (DCC), og ved konstant moment sætpunkt, 6,4 kNm, den 24.5. (DCC) og den 25.5. (adaptiv regulering). Indgående tørstof var 3,03 %.

Ligesom i maj måned viste variationen i momentet sig generelt lavere ved anvendelse af den adaptive regulering, se bl.a. Fig. 3. En sammenligning mellem natkørslen med DCC, 20.9.2012 kl. 16 – 21.9.2012 kl. 7, og tilsvarende natkørsel med adaptiv regulering dagen efter, 21.9.2012 kl. 16 – 22.9.2012 kl. 7, viser en standardafvigelse på

- 0,057 kNm for adaptiv regulering;
- 0,078 kNm for DCC regulering.

Ved brug af adaptiv regulering er variationen her reduceret 27 %.

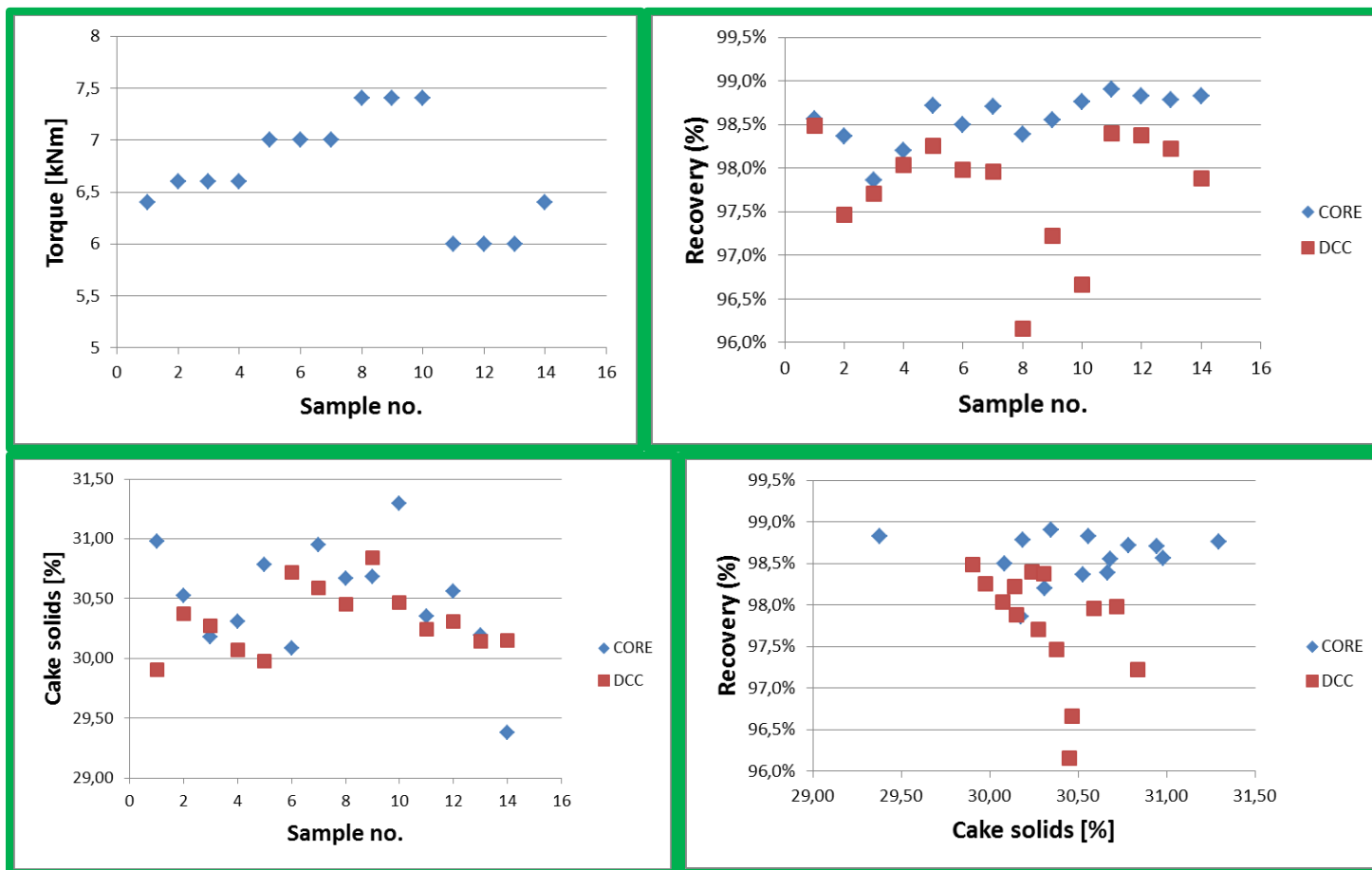
Det bemærkes, at selv for hele weekend-perioden 21.9.2012 kl. 16 – 23.9.2012 kl. 11 blev standardafvigelsen med den adaptive regulering fundet til 0,056 kNm.



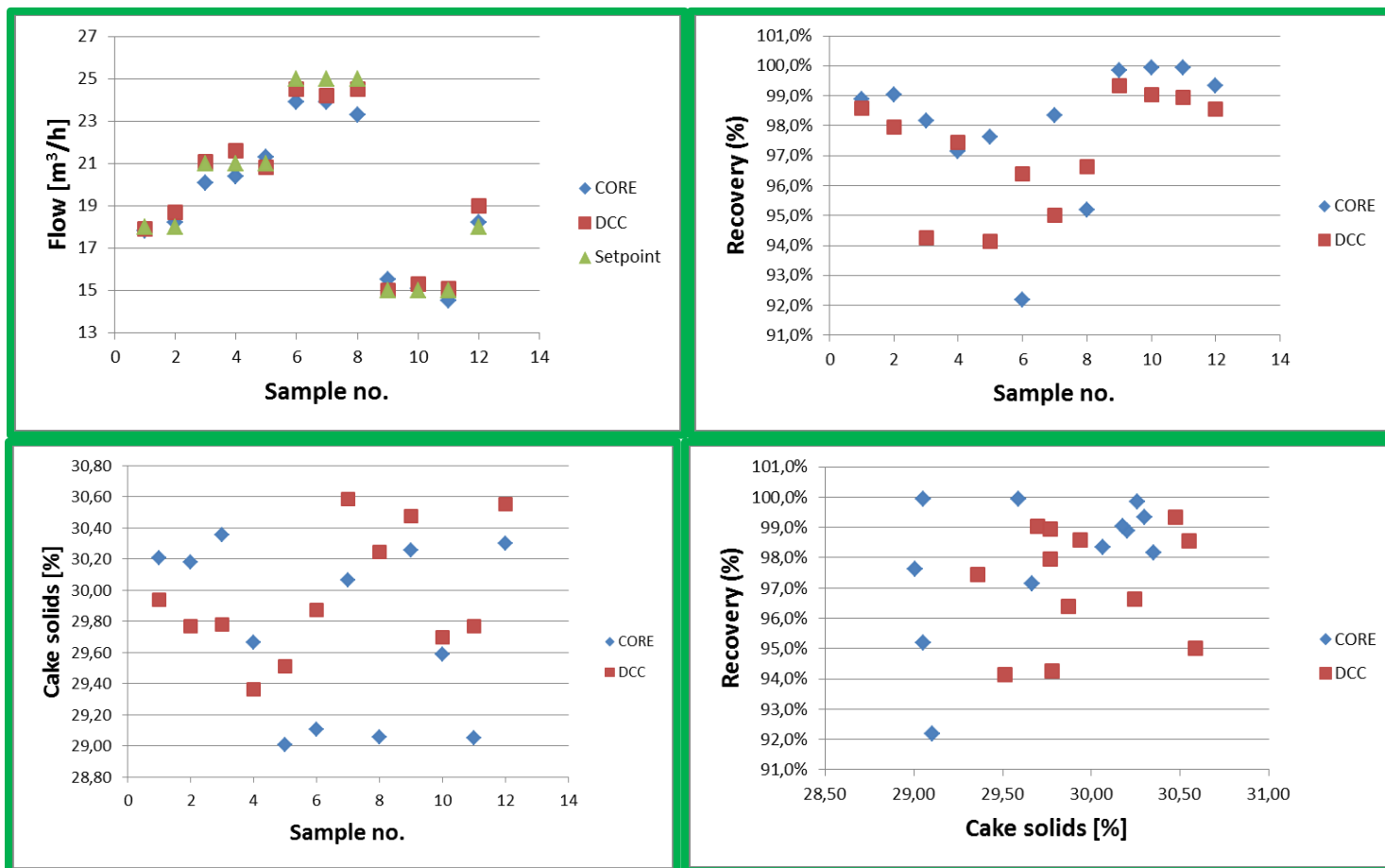
Figur 12. Variationen er større ved brug af DCC (tv.) end ved brug af adaptiv regulering (th.).

Generelt bliver recovery fundet at ligge højere ved brug af adaptiv regulering.

Som det ses af Figs. 13 og 14 ligger recovery generelt højere for den adaptive regulering end for DCC reguleringen. I det kritiske tørstof område 30 % \pm 0,5 % ligger den gennemsnitlige recovery 0,7 \pm 0,3 % højere for den adaptive regulering. Denne ændring i recovery kan i det område erstattes med et øget tørstof på 0,4 \pm 0,2 % (se Fig. 11). For en dekanter med en årlig slamproduktion på 10.000 ton giver det en potentiel besparelse på ca. 100.000 kr./år.

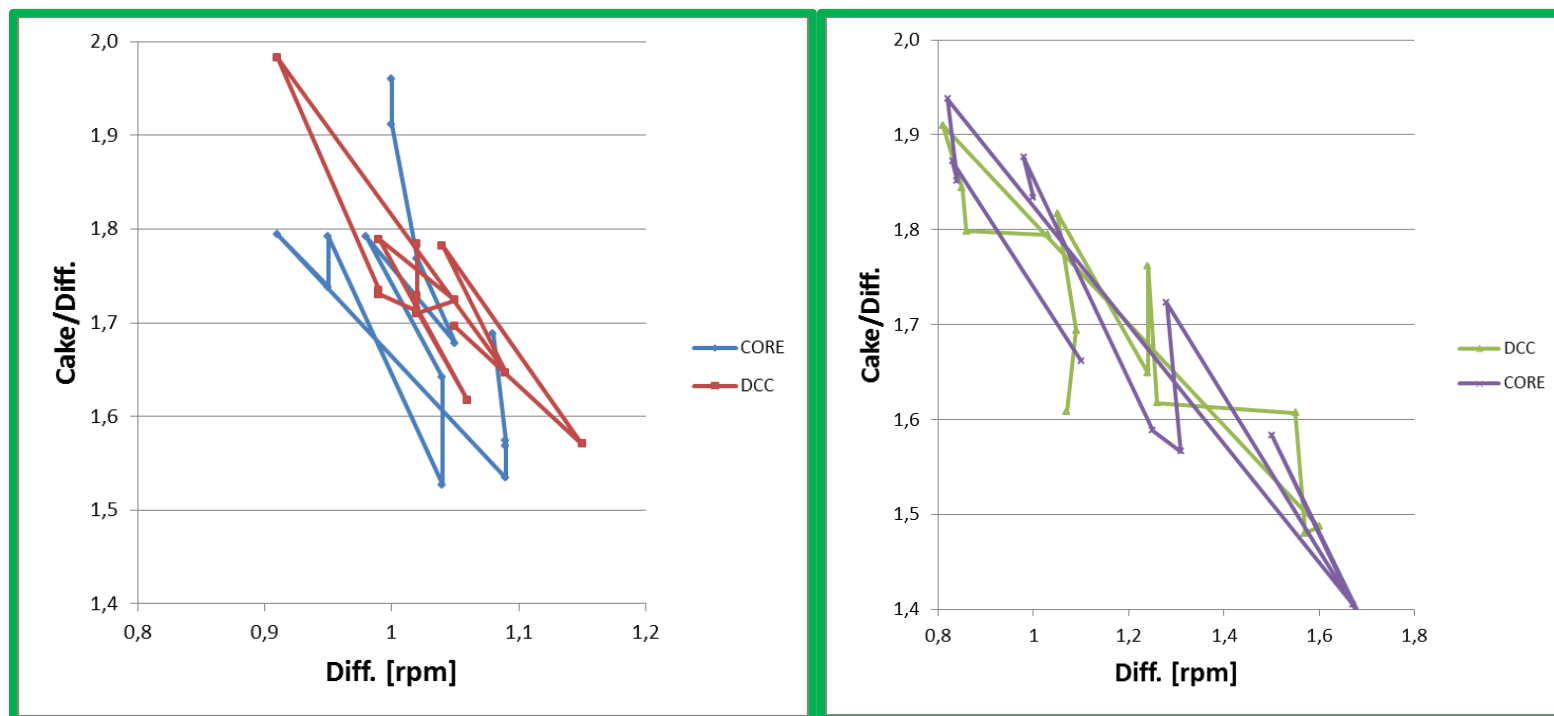


Figur 13. Testresultater 20.9.2012 (adaptiv regulering) og 21.9.2012 (DCC). Feed flow blev fastholdt ved 18 m³/h.



Figur 14. Testresultater 24.9.2012 (DCC) og 25.9.2012 (adaptiv regulering). Moment sætpunkt blev fastholdt ved 6,4 kNm.

Fig. 15 viser et dimensionsløst effektivitetsmål $Cake/Diff$ for hvor meget tørstof der transporteres ud per differentiell omdrejning. Ved højere differentiell hastighed er slamkagen ofte "blødere", tørstofprocenten er mindre og $Cake/Diff$ falder i værdi.



Figur 15. Effektivitetsmålet $Cake/Diff$. Tv.: $Cake/Diff$ fra 20.9.2012 (adaptiv regulering) og 21.9.2012 (DCC), hvor feed flow var $18 \text{ m}^3/\text{h}$.
Th.: $Cake/Diff$ fra 24.9.2012 (DCC) og 25.9.2012 (adaptiv regulering), hvor moment sætpunktet var $6,4 \text{ kNm}$.

Modeludvikling

I tilknytning til udviklingen af adaptiv dekanterregulering er en del forskellige modeller blevet undersøgt. Nogle af disse er beskrevet i bilagene nævnt her nedenfor.

En detaljeret undersøgelse er bl.a. lavet om dæmpning af en sinusforstyrrelse, hvor det blev undersøgt, under hvilke forhold det var en fordel at skifte til en adaptiv MPC (model predictive control) strategi, se bilag "MPC-decanter".

Endvidere er analyser udført, hvor estimater på varianserne i moment og i differentiell hastighed blev undersøgt for at se om de kunne fortælle noget mere om hvornår en kritisk fyldningsgrad var nået i dekanteren, se bilag "EgaaDataAnalyse".

Endelig er en artikel blevet skrevet om hvordan modelparametre løbende kan estimeres og dermed hvordan en model-baseret regulering løbende kan adapteres til procesforholdene, se bilag "AAU paper CORE". Artiklen er optaget til IFAC'14 konferencen i Sydafrika, 24.-29.8.2014 (The 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control).