

Rethink sludge - optimering af slamafvandingen via onlinesensorer kombineret med kamerateknologi



Rethink sludge – optimering af slamafvandingen via onlinesensorer kombineret med kamerateknologi

DATO: 19. august 2019

Projekt ID: 1170.2017

Udgiver:
DANVA

Udarbejdet af:
Hanne Løkkegaard, Teknologisk Institut
Morten Bormann Nielsen, Teknologisk Institut
Morten Lykkegaard Christensen, Aalborg Universitet
Mads Koustrup Jørgensen, Aalborg Universitet
Henriette Casper Jensen, Aalborg Universitet
Niels Kjeldgaard, Energi Viborg Vand
Mogens Lindgaard, Energi Viborg Vand
Ole Pedersen, Hedensted Spildevand
Alf Simonsen, Hjortkær Maskinfabrik

Finansiering:
Projektet er finansieret af
VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

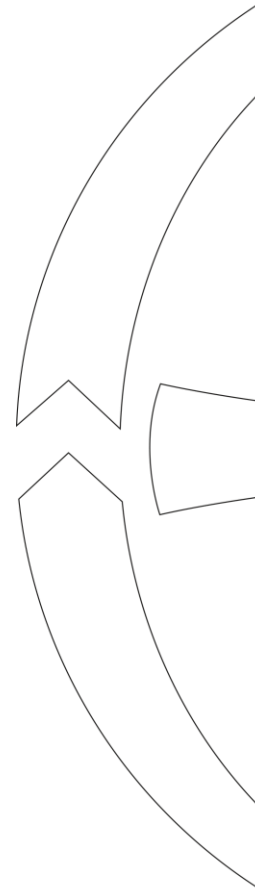
Samarbejdspartnere:
Energi Viborg Vand A/S
Hedensted Spildevand A/S
Hjortkær Maskinfabrik A/S
Aalborg Universitet
Teknologisk Institut

Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning):

Spildevand

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning	3
2	English summary	5
3	Introduktion	7
4	Projektets betydning for vandbranchen	8
4.1	Marked og/eller anvendelsesmuligheder	8
4.2	Næste skridt	9
4.3	Formidlingsplan	9
5	Projektet	10
5.1	Formål	10
5.2	Output	10
5.3	Projektresultater	11
5.4	Konklusion	50
6	Bilag	52



1 Sammenfatning

Der er i projektet udviklet en kamerateknologi, som offline kan måle størrelsen af slamflokke. Teknologien består af en glasbeholder og tilhørende optimeret lyssætning, der gør det muligt at tage billeder, som efterfølgende kan omregnes til slamflokkenes størrelse vha. en avanceret algoritme. Det er i projektet vist, at flokstørrelserne kan benyttes som styringsparameter i forhold til at optimere tørstofprocenten i det afvandede slam.

Der er i projektet gennemført en lang række tests både i laboratoriet og i fuldskala på Viborg Centralrenseanlæg og Hedensted Renseanlæg. Formålet var at afdække den nyudviklede kamerateknologis potentiale til at optimere slamafvandingen ved at benytte slamflokstørrelsen som styringsparameter. Forsøgene i Viborg har vist, at kamerateknologien er egnet som et af flere input til at optimere slamafvandingen i forbindelse med afvanding med en skruepresse, hvor polymeropblanding og modning foretages før selve skruepressen. Selvom der er udført en række forsøg med afvanding vha. dekantercentrifuge i Hedensted, har det ikke været muligt nå til en konklusion omkring teknologiens anvendelighed sammen med denne afvandingsmetode. En sådan konklusion vil kunne opnås med yderligere forsøg ved lavere doseringer under samtidig observation af rejektivandskvalitet.

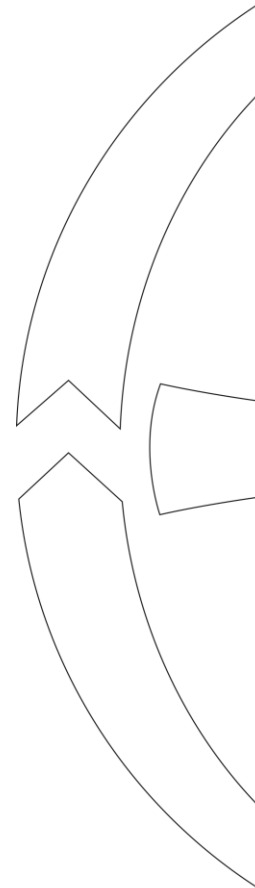
Forsøgene har vist en sammenhæng mellem flokstørrelse og tørstofindhold i det afvandede slam, men det har ikke været muligt at finde andre fysiske eller kemiske tilstandsparametre, der kan måles med onlinesensorer, og som sammen med kamerateknologien kan benyttes til styring af slamafvandingen. Det vurderes, at kamerateknologien alene er en så kraftfuld teknologi, at den kan stå alene som et brugbart værktøj på dette område. Vi ser desuden et potentiale i også at inddrage resultatparametre i optimeringen af polymerdoseringen.

Det vil kræve yderligere udvikling at bringe kamerateknologien i stand til at måle flokstørrelser online. Såfremt fremtidig udvikling muliggør en sådan måling, vil en kamerateknologi skulle indkøres efter den individuelle slamtype og aktuelle renseanlæg. Når sammenhængen mellem renseanlægstype, flokstørrelse og afvandingspotentialer er fastlagt, vurderes en onlineversion af teknologien at udgøre et særdeles værdifuldt værktøj til løbende optimering af slamafvandingen i forhold til følgende parametre:

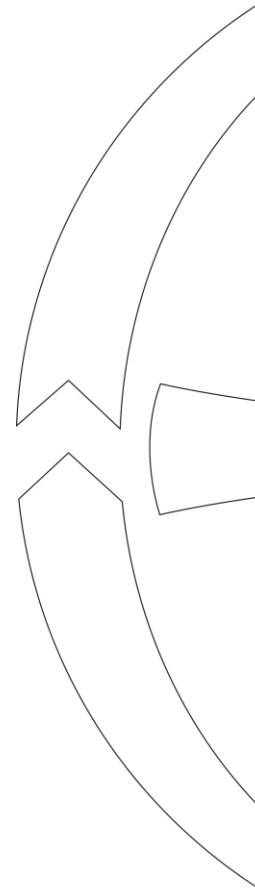
- At opnå stabilt højt tørstofindhold i det afvandede slam. Der er i forsøgsperioden observeret en relativt stor variation i slammet over få timer. En onlineteknologi vil kunne sikre, at der kontinuerligt tilsættes den optimale mængde polymer og evt. koagulant.
- En onlinestyling kan kombineres med en løbende, automatisk vurdering af den optimale polymerdosering i forhold til totaløkonomien for slamhåndteringen. Dermed får renseanlæggene mulighed for kontinuerligt at styre slamafvandingen så økonomisk optimalt som muligt.

I projektet er der desuden udviklet en ny, simpel laboratorieanalyse. Ved analysen måles der på det slam, der går ind til afvanding, hvorved det er muligt at estimere det højst opnåelige afvandingsresultat.

Forsøgene i Viborg og Hedensted har dokumenteret, at der på begge anlæg stadig er optimeringspotentialer på 1-2 procentpoint at hente på totaløkonomien i slamhåndteringen.



Der er imidlertid stor forskel på den udgift, de to anlæg har til hhv. polymer og slambortskaffelse, og en sådan besparelse vil derfor skulle opnås ad forskellige veje. For Viborg Centralrenseanlæg er det vist, at en øget udgift til polymerforbrug ville kunne kompenseres af en større besparelse på slambortskaffelse, mens det for Hedensted Renseanlæg er vist, at polymeromkostningerne kan reduceres uden at dette vil øge udgifterne til slambortskaffelse.



2 English summary

In this project, a camera technology has been developed, that is able to measure the size of flocculated sludge offline. The technology consists of a glass container and associated lighting, that allows images to be acquired, that can subsequently be converted to sludge floc size via an advanced algorithm. It has been shown that the floc size can be used as a control parameter with respect to the optimization of the dry matter content of the dewatered sludge.

During the project, a long line of experiments has been carried out in the laboratory and in full scale at Viborg Central Wastewater Treatment Plant and Hedensted Wastewater Treatment Plant. The purpose of these experiments was to uncover the potential of the newly developed camera technology, with respect to optimizing the dewatering process, by using floc size as a control parameter. The experiments in Viborg have shown that the camera technology is suitable for use as one of several inputs for optimizing dewatering of sludge by screw press, where polymer mixing and maturation is carried out before the press. Although a range of experiments were carried out on a decanter centrifuge in Hedensted, it has not been possible to reach a clear conclusion with respect to the usefulness of the technology, when used in conjunction with this method for dewatering. Such a conclusion should be obtainable by carrying out further experiments at lower polymer dosage rates, during simultaneous monitoring of the quality of the reject water.

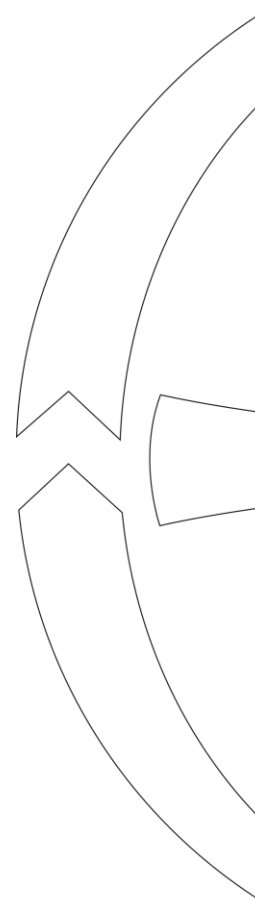
The experiments have shown a link between floc size and dry matter content of the dewatered sludge, but it has not been possible to identify other physical or chemical state parameters, measurable by online sensors, that can be used to control the sludge dewatering process together with the camera technology. It is considered that the camera technology alone is a sufficiently capable technology to be used as a tool in isolation in this area. The project has identified a potential in including result parameters in the optimization of the polymer dosage.

Further development is required in order to bring the camera technology to a state where it can measure floc size online. If future development enables such measurements, then the camera technology must be commissioned according to the specific type of sludge and wastewater treatment plant. When the link has been established between the type of plant, floc size and potential for dewatering, it is considered that an online version of the technology will be a valuable tool in the continuous optimization of the dewatering process, with respect to the following parameters:

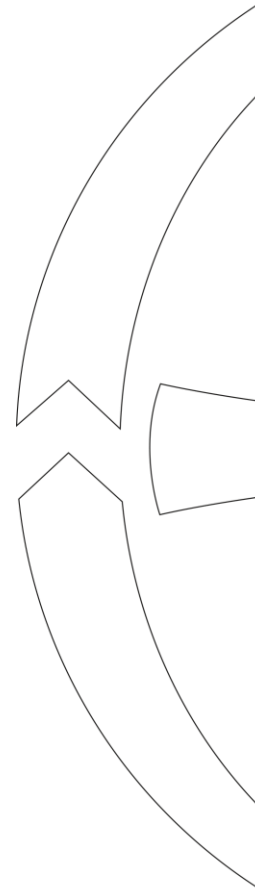
- Obtaining a stable high dry matter content in the dewatered sludge. Relatively large variations were observed in the sludge over the course of few hours during the experimental period. An online technology will constantly ensure that an optimal amount of polymer and coagulant (if relevant) is added to the sludge.
- An online unit can be combined with continuous and automatic evaluation of the optimal strategy for polymer dosage, from the point of the overall cost of handling the sludge. Thus, the wastewater treatment plants get the opportunity to continuously control the dewatering process in the most economical way possible.

During this project, a new simple laboratory analysis has also been developed. The analysis measures on the sludge that enters the dewatering process and makes it possible to estimate the highest dry matter content obtainable for the sludge.

The experiments in Viborg and Hedensted have documented that optimization potentials of 1-2 percentage points can still be obtained on the total economy of handling the sludge.



However, there is a big difference in the cost of polymer and sludge disposal at the two plants, and such savings would therefore have to be achieved by different routes. For Viborg Central Wastewater Treatment Plant it has been shown that an increase in polymer consumption can be outweighed by a larger saving on sludge disposal. For Hedensted Wastewater Treatment Plant it has been shown that the polymer consumption can be reduced without increasing the cost of the sludge disposal.

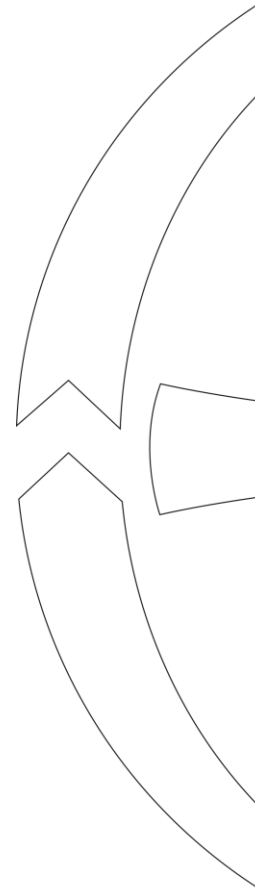


3 Introduktion

I dag styres tilsætningen af polymer til slamafvandingen typisk via tørstofindholdet (eller SS) i det indgående slam, mens det sætpunkt, der benyttes, justeres over tid på baggrund af periodiske målinger af tørstofindholdet i det afvandede slam. Denne mangel på onlineregistrering af slamegenskaber efterlader driftspersonalet på anlæggene med utidssvarende viden på områder, hvorfor driftstilpasninger i for høj grad bliver påvirket af tilfældigheder. De seneste år er der sket en kraftig udvikling inden for onlinestyling af processer på renseanlæggene. Denne udvikling er imidlertid ikke fulgt med, når det drejer sig om slamafvandingen. Dette til trods for at slamhåndteringen udgør en betydelig del af de samlede driftsudgifter på de kommunale renseanlæg og i fremtiden kan blive en endnu større post, hvis det bliver nødvendigt at afbrænde slammet.

Det primære mål med dette projekt har været at udvikle en ny metode til onlinestyling af slamafvandingen baseret på kamerateknologi og om muligt kombinere denne med andre relevante onlinesensorer. I dag benyttes kamerabaserede løsninger ikke i forbindelse med slamafvanding i spildevandsbranchen, men finder i stor udstrækning anvendelse i fremstillingsindustrien og i fødevarerindustrien i forbindelse med automatisering og robotteknologi. Et sekundært mål har været at opnå en dybere forståelse af slamflokkene og deres evne til at binde vand, særligt med henblik på at kunne forudsige slamafvandingsegenskaberne og det maksimalt opnåelige tørstofindhold ved mekanisk afvanding.

Projektet har prioriteret tests på de deltagende renseanlæg frem for laboratorieforsøg for at kunne kortlægge de ændringer, der konstant sker i spildevand, og henvføre disse til ændringer i slamafvandingsegenskaberne. Den nyudviklede kamerateknologi er afprøvet on-site på de to renseanlæg i længerevarende forsøgsserier, hvor variationer i tørstofindhold og en række fysisk/kemiske egenskaber er undersøgt. Den efterfølgende databehandling og analyse med machine learning-værktøjer har afdækket en række interessante sammenhænge og har demonstreret, at der stadig er potentiale for yderligere optimering af slamafvandingen.



4 Projektets betydning for vandbranchen

Projektet er banebrydende for spildevandsbranchen, fordi det åbner op for fuld automatisering af slamafvandingen, og netop på dette område er der behov for nytænkning for at forløse det potentiale, der er for optimering. Samtidig har branchen behov for at afprøve nye muligheder for onlinestyling på slamområdet, så der på sigt kan spares en del af de mandetimer, som i dag bruges på manuel optimering af slamafvandingen. Onlinestyling åbner op for kontinuerligt at kunne drive slamafvandingen med et optimalt afvandingsniveau.

Små ændringer i slammets tørstof vil kunne få endnu højere betydning i fremtiden, hvis der bliver indført forbud mod eller mere restriktive regler for udbringning af slam på landbrugsjord. Eksempelvis vil en forbrændingsløsning for slammet blive væsentlig dyrere for forsyningerne, og dermed kan selv små optimeringer på tørstofindhold efter afvanding i fremtiden give en økonomisk gevinst.

Den nyudviklede laboratoriemåling af vandpuljerne vil kunne benyttes som et værktøj, der kan give spildevandsforsyningerne viden om, hvilket tørstofniveau der burde kunne opnås med netop deres slam, og dermed give input til beslutningsprocessen omkring skift af polymertype og/eller afvandingsteknologi.

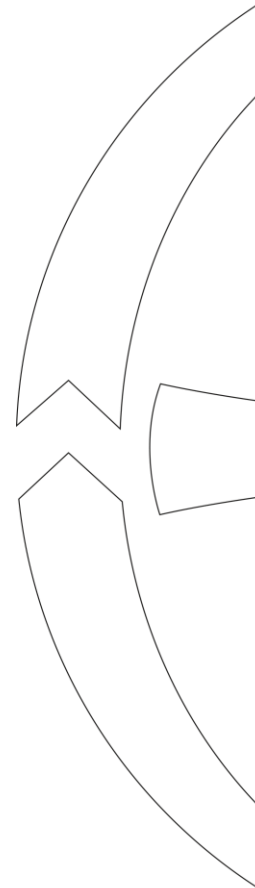
4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Den nye kamerateknologi vil, når den er færdigudviklet til en onlineenhed, kunne sælges til kommunale og private renseanlæg både i Danmark og i udlandet.

Det vurderes, at der vil være meget stor efterspørgsel på en sådan teknologi, specielt i lande hvor slammet afbrændes efter afvanding, og prisen for afsætning af slam derfor er højere, end tilfældet er i dag for afsætning af hovedparten af slam i Danmark.

Større mulighed for styring af slamafvandingen og bedre mulighed for dagligt at opnå det mest optimale polymerforbrug kan give slamafvandingen et nødvendigt løft i forhold til bæredygtighed, hvilket også er efterspurgt i branchen både nationalt og internationalt.

For de anlæg, der med kamerateknologien vil kunne opnå en optimering af slamafvandingen med 2 procentpoint, vil der kunne opnås betydelige besparelser i driften. Hvis der er tale om et renseanlæg på 100.000 personækvivalenter (PE) med rådnetank, kan dette medføre en reduktion i slamafsætningen på ca. 500 tons/år. Med en pris på ca. 300 kr./tons medfører dette en besparelse på 0,15 mio. kr./år. Med denne forretningsmodel forventes det, at en spildevandsforsyning vil kunne opnå en tilbagebetalingstid på teknologien på 3-5 år. Tilbagebetalingstiden vil blive kortere for større anlæg og for anlæg, som betaler mere end 300 kr./tons for afsætning af slammet.



4.2 Næste skridt

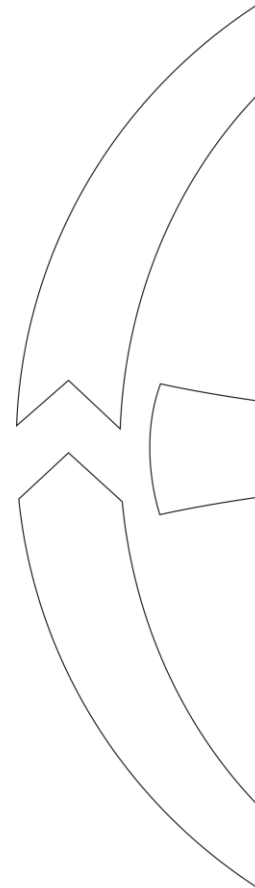
Nærværende projekt har vist, at offline målinger af flokstørrelse med kamerateknologien alene kan forudsige tørstofindholdet efter slamafvanding. Næste skridt vil være at udvikle en version af sensoren, der kan foretage kontinuerlig onlinemåling på driften, evt. i pilot-skala. Efter at driftsstabiliteten er optimeret og grundigt afprøvet, forventes teknologien at være klar til markedsføring og salg.

4.3 Formidlingsplan

Projektet er allerede blevet formidlet gennem Dansk Vandkonference 2018 og Spildevandsteknisk Forenings Døgnkursus 2018. Desuden er projektet blevet præsenteret ved IDA Miljøets møde "Big Data – Muligheder og udfordringer" d. 26/9 2018. I 2019 er projektet blevet formidlet ved Vandforum.

Projektets resultater vil primo 2019 blive formidlet gennem tidsskrifterne Dansk Vand og Spildevand. Der vil desuden blive indsendt abstract til IWA 2020 i København.

Der er indsendt en videnskabelig artikel om vandpuljer i slam til det internationale videnskabelige tidsskrift *Chemosphere*.



5 Projektet

5.1 Formål

Slamafvandning på danske renseanlæg styres i dag primært ved at dosere polymer i forhold til slamflowet og i et udsnit af tilfældene ved også at indregne tørstofindholdet i det indkomne slam, så polymermængden defineres ud fra et tørstofflux. Styring af polymerdoseringen ud fra den tilledte vandmængde hhv. tørstofmængde er begge tilnærmede tilgange, som ikke tager hensyn til, hvor god en flokkulering og dermed afvandning, der opnås.

Kamerateknologi er ny teknologi, der åbner mulighed for at måle direkte på, hvor god flokkuleringen er lige inden afvandingsprocessen. Der er naturligvis en række barrierer, der skal håndteres; bl.a. er det et vanskeligt medie at måle på, ligesom der mangler viden om den sammenhæng, der er mellem forskelle i slammets flokkarakter og de afvandingsgenskaber, der kan opnås med forskellige afvandingsprocesser (eksemplificeret i dette projekt ved anvendelse af skruepresse og dekantercentrifuge).

Projektets formål har været at udvikle kamerateknologien til anvendelse i flokkulering og afvandning af spildevandsslam, finde måleteknologiens anvendelsespotentiale og få viden om forbedringspotentialet ved de forskellige afvandingssteknologier og samtidig opnå en 2-4 % forbedring af slamafvandningen.

Projektet har omfattet 4 faser:

1. Laboratorieundersøgelse af specifikke slamparametre og af slamflokkene med fokus på karakterisering af flokkstruktur for herefter at omsætte den nye viden i forhold til kamerateknologien og øvrige onlinesensorer.
2. Udvikling af kamerateknologi til måling af slamflokke.
3. Test af udviklet kamerateknologi til måling af slam og flokkstruktur på to renseanlæg.
4. Evaluering af de teknologiske muligheder.

5.2 Output

Projektet har resulteret i opbygningen af en stor vidensbase omkring, hvordan afvandingsgenskaberne af spildevandsslam kan relateres til en række visuelle egenskaber, som det er muligt at analysere detaljeret med kombinationen af industriel kamerateknologi, avanceret billedbehandling og machine learning.

Output af projektet er en udviklet prototype af en kameraopstilling med databehandlingsteknologi, som kan måle partikelstørrelsesfordelingen i flokkuleret slam. Resultaterne af partikelstørrelsesmålingen har vist sig direkte anvendelig til at fintune doseringen af polymer.

Prototypen vil være udgangspunktet for fremtidig udvikling af en enhed, der kontinuerligt kan overvåge ændringer i slammet og online styre og tilpasse doseringen af polymer til den målte partikelstørrelsesfordeling.

Teknologien vil på sigt kunne etableres på renseanlæg for at opnå en mere stabil slamafvanding med et konstant højt tørstofindhold og et reduceret polymerforbrug og dermed opnå en økonomisk gevinst for forsyningsselskaberne.

Projektet har desuden omfattet en ny tilgang til slammets vandpuljer, og der er udviklet en ny analysemetode til i laboratoriet at bestemme potentialerne for slamafvanding. Denne analyse kan give renseanlæggene en værdi for, hvor højt et tørstofindhold der teoretisk kan opnås for den specifikke slamtype.

5.3 Projektresultater

Testlokaliteter og prøvetagning

Forsøg blev gennemført som fuldskalaforsøg, hvor der manuelt blev udtaget slamprøver mellem polymerdosering og afvanding i Viborg og Hedensted. I forsøgene blev polymerdoseringen justeret på fuldskalaanlægget, og prøver blev udtaget og hældt over i måleopstillingerne on-site. Alle indstillinger af polymerdosering, omrøring af polymerblandetank og tilsætning af koagulant foretages direkte på fuldskalaanlægget, og ændringer måles ved at udtage en prøve og manuelt overføre prøven til måleopstillingen med kamerateknologien.

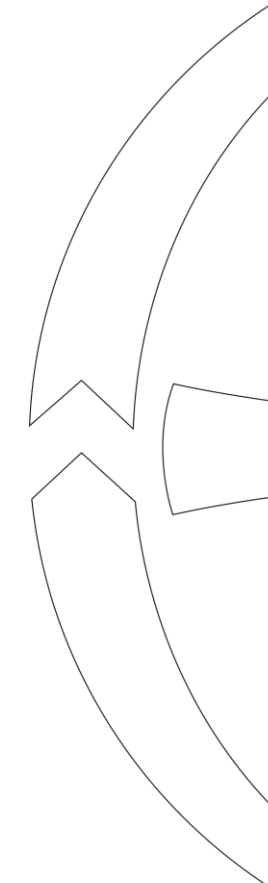
Viborg Centralrenseanlæg

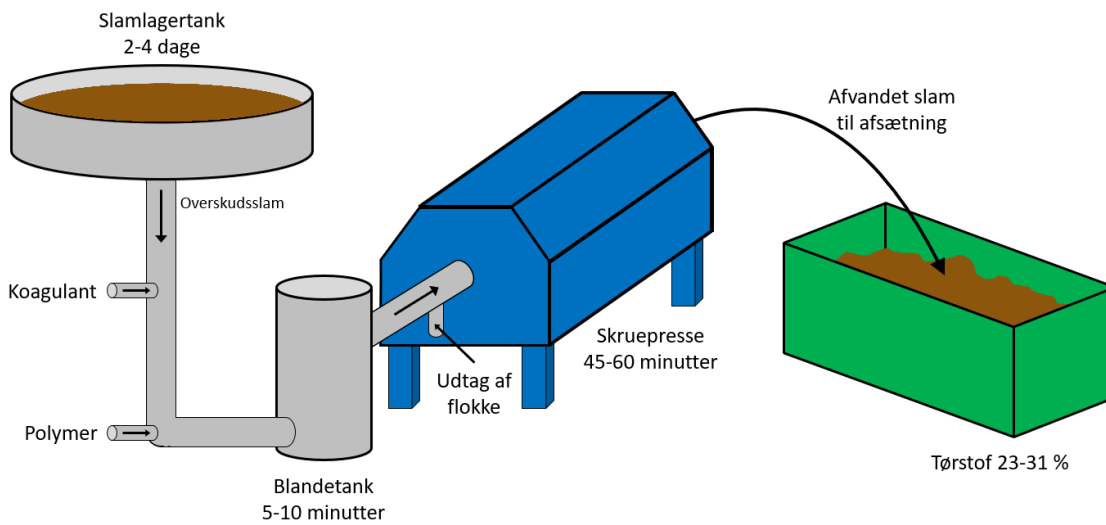
I Viborg tilsættes polymer (Aquaflok 71300BB) og koagulant (polyaluminiumklorid, Kemira PAX-215, koncentration 30-40 %, dosering 1 l/m³ spildevand) inden opblanding i blandetank. Afvanding foretages i en skruepresse (IEA-skruepresse type SP0705 S).

Polymer tilsættes via en mængdeproportional dosering ud fra indgående slamflow og målt tørstofindhold før afvanding.

Viborg Centralrenseanlæg er belastet med ca. 50.000 PE, hvor primær- og aktivslam udrådnes og derefter afvandes sammen. Der blev i 2018 bortskaffet 3.560 tons afvandet slam fra anlægget.

Flowdiagram for afvanding af slammet efter rådnetanken i Viborg er vist i Figur 1.



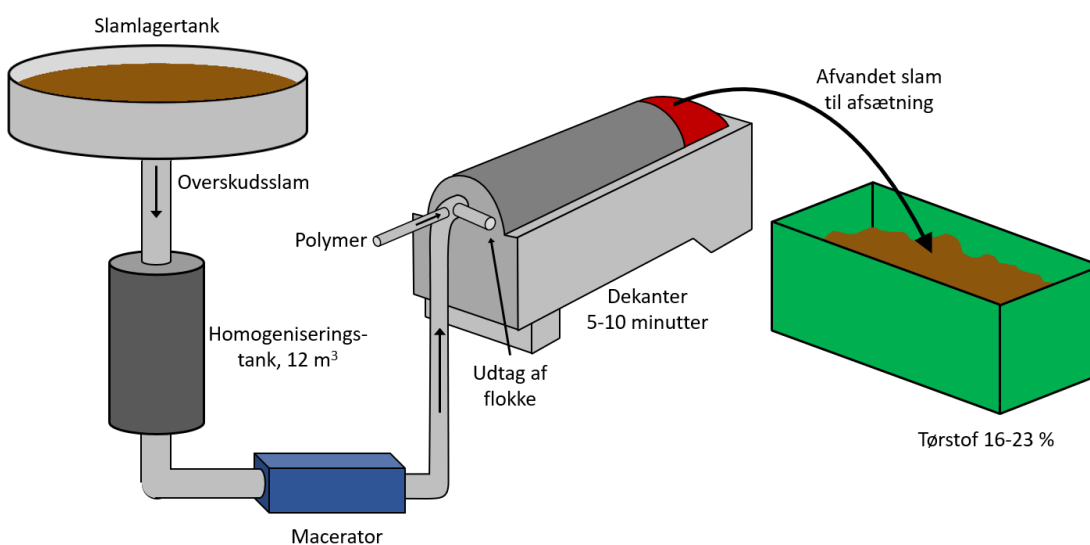


Figur 1. Oversigtsdiagram over system til afvanding af rådeslam ved Viborg Centralrenseanlæg.

Hedensted Renseanlæg

I Hedensted afvandes aktivt slam (ikke udrådnet slam). Afvandingssystemet i Hedensted består af en homogeniseringstank og en macerator efterfulgt af en dekantercentrifuge. Polymeren tilsættes til det aktive slam lige umiddelbart før dekanter centrifugen (HAUS DDE-5342). I Hedensted anvendes polymer af typen Aquaflok 65C.

Polymer doseres i fast flow via en doseringspumpe med indtastning af % ydelse. Slampumpning til afvandingen styres efter enten indtastet fast flow eller online ud fra dekanterens momentvisning. Hedensted Renseanlæg er belastet med ca. 50.000 PE, og den årlige slamproduktion på anlægget er ca. 2.700 ton. Flowdiagram for afvanding af slammet i Hedensted er vist i Figur 2.



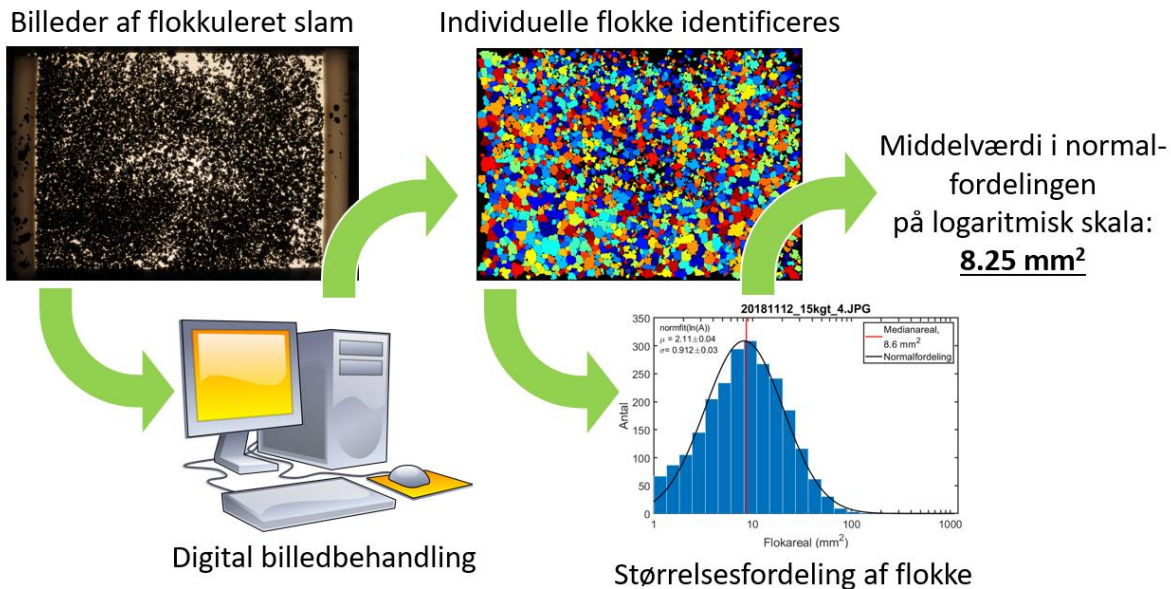
Figur 2. Oversigtsdiagram over system til afvanding af aktivt slam i Hedensted.

Udvikling af kamerateknologi, billed- og databehandling

For at opnå en løsning, der er let at bruge, er det nødvendigt at omsætte billederne fra kameraet til et så simpelt mål for slamflokstørrelsen som muligt, under forudsætning af at dette mål stadig er repræsentativt for den information, der er i billedet. Dette gøres konkret ved at køre billedet igennem en avanceret algoritme i programmet MATLAB. Der vil nedenstående blive redegjort for den overordnede opbygning af databehandlingen.

Hele billedbehandlingsprocessen er illustreret i Figur 3. Det rå billede fra kameraet beskæres først for at fjerne kanterne af beholderen, hvorefter billedet omdannes til et rent sort/hvidt billede. En algoritme opdeler de flokke, der rører ved hinanden, så der opnås et billede, hvor hver enkelt flok er identificeret (Figur 3, øverst i midten, hver flok har sin egen farve). Da alle billeder er taget med samme afstand fra kamera til prøve, kan flokkes størrelse (der indtil dette punkt måles i antal pixels) omregnes til et tværsnitsareal i mm^2 .

Flokstørrelserne er log-normalfordelte (den sorte linje i histogrammet i Figur 3), og det er i udgangspunktet tilstrækkeligt at beskrive denne fordeling med en middelværdi og en spredning. Da den relative spredning tilmed er forholdsvis konstant på tværs af prøverne, er middelværdien alene et godt mål til at repræsentere billederne. I den statistiske analyse er det derfor kun middelværdien i størrelsesfordelingen, der er benyttet til at beskrive flokkene.



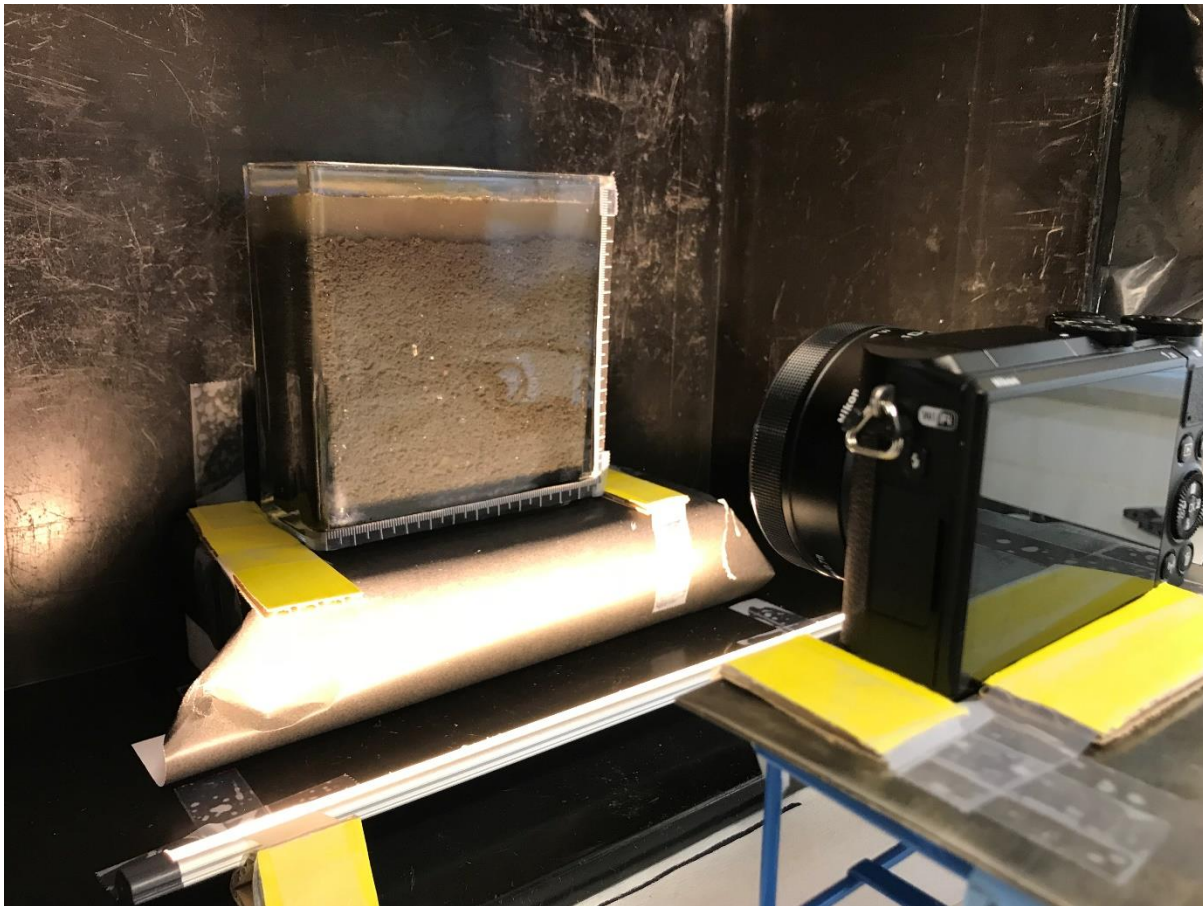
Figur 3. Den overordnede struktur af billedbehandlingen. Det rå billede fra kameraet behandles i programmet MATLAB med en algoritme, der opdeler de mørke områder i billedet i individuelle flokke. Arealet af hver individuel flok beregnes og danner baggrund for et histogram over størrelserne på logaritmisk skala. Flokstørrelserne følger en log-normalfordeling, og det er middelværdien i denne fordeling, der benyttes i den videre statistiske analyse.

Der er igennem projektet udviklet og testet fire prototyper på en kameraopstilling til bestemmelse af flokstørrelser. Opstillingerne har alle benyttet et Nikon 1 J5 digitalkamera kombineret med en 1 NIKKOR 10-30 mm 1:3.5-5-6 VR-linse. Hver ny version blev optimeret på lyssætningen, mængden af udtaget prøve, måden prøven udtages på, fortyndingsgraden af flokkene og geometrien af den beholder, flokkene blev overført til.

I de følgende afsnit beskrives hver version af prototypen, hvilke erfaringer der blev gjort ved hver version, og hvordan disse er benyttet i den videre udvikling. Herefter følger en separat beskrivelse af, hvordan billedbehandlingen identificerer individuelle flokke og beregner deres størrelse. Slutteligt beskrives den samlede teknologi med en vurdering af teknologiens potentialer.

Prototype 1

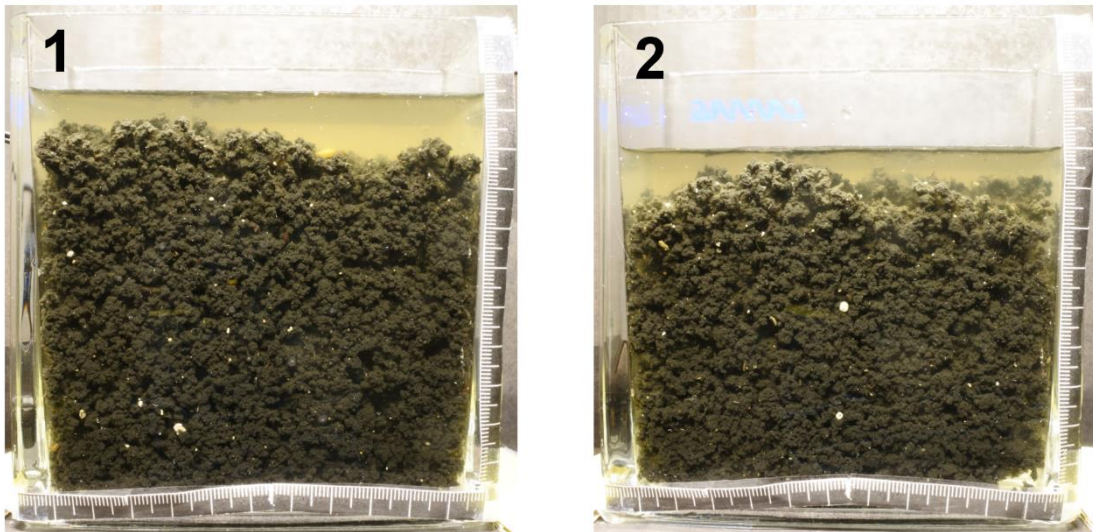
Den første prototype blev opbygget med en firkantet glasbeholder med en volumen på 500 mL, hvor de flokkulerede slamflokke blev hældt i, og herefter blev beholderen oplyst fra siden med en LED-liste (se Figur 4). Kameraet blev placeret så tæt på flokkene som muligt for at opnå så god detaljegrad i billedet som muligt. Glasbeholder, lys og kamera blev stillet ind i en mørklagt kasse for at undgå refleksioner af lys fra lokalet i glassets overflade.



Figur 4. Den første prototype på en kameraopstilling. Kameraet skubbes ind mod to stykker pap, således at det altid befinder sig det samme sted i forhold til prøveglasset, som ligeledes holdes på plads af et par stykker pap.

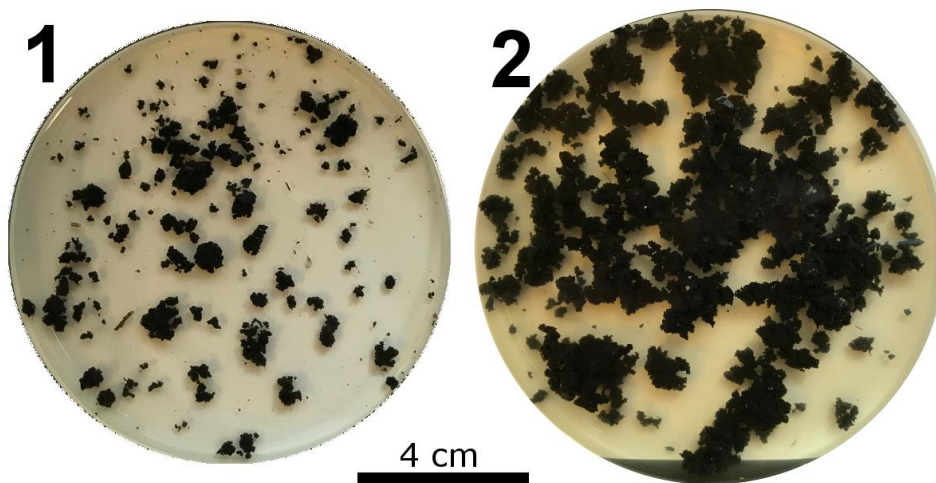
Prototypen blev herefter brugt til den første forsøgsrække på Viborg Centralrenseanlæg. Under denne forsøgsserie blev polymerdoseringen varieret fra 13 kg/t TS (normal drift) og 1,5 kg hhv. op og ned til 14,5 kg/t og 11,5 kg/t, og endelig blev omrøringen i blandetanken reduceret. I Figur 5 ses billeder af slamflokke udtaget ved 13 kg/t (1) og fra 14,5 kg/t (2) efter ophældning i glasbeholderen. Det umiddelbare visuelle indtryk af billederne er, at

der ikke er den store forskel på flokkene ved disse to doseringer, hvilket senere blev bekræftet i dataanalysen, idet middelflokstørrelserne ved begge doseringer er beregnet til $1,6 \text{ mm}^2$.



Figur 5. Billeder af flokke udtaget ved doseringer på hhv. 13 kg/t (1) og 14,5 kg/t (2) efter ophældning i glasbeholderen. Det er meget svært at se nogen forskel med det blotte øje.

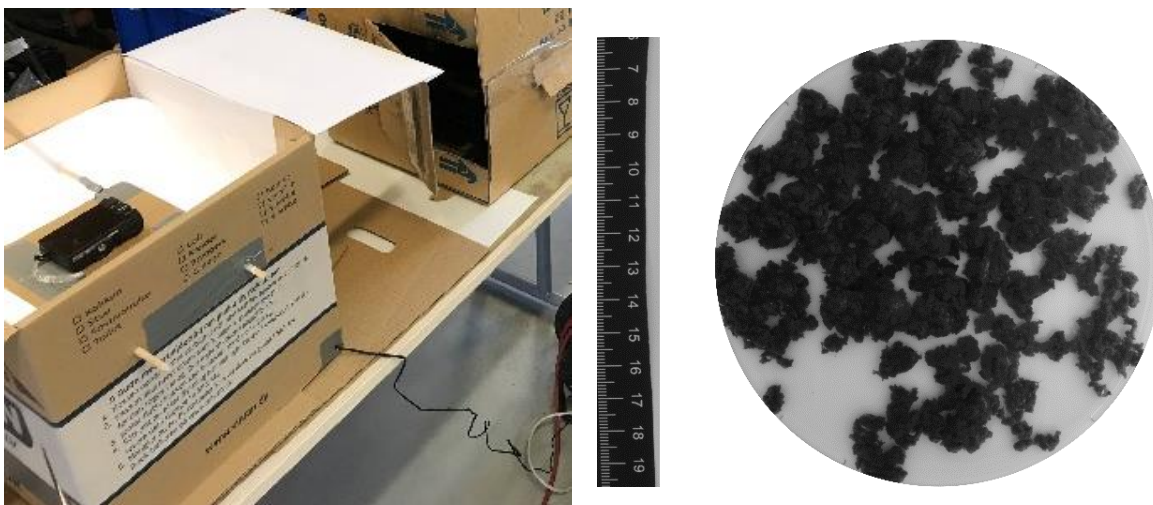
Under forsøgene blev der ved hver dosering også hældt en lille mængde flokke over i en petriskål som efterfølgende blev fotograferet ovenfra. Eksempler på to sådanne billeder ses i Figur 6, igen ved doseringer på 13 kg/t og 14,5 kg/t. Her bemærkes det, at der er tydelig visuel forskel på flokstørrelsen, hvilket også bekræftes i billedbehandlingen, hvor den målte middelflokstørrelse er hhv. $4,5 \text{ mm}^2$ ved 13 kg/t og $9,9 \text{ mm}^2$ ved 14,5 kg/t.



Figur 6. Billeder af flokke udtaget ved doseringer på hhv. 13 kg/t (1) og 14,5 kg/t (2) efter ophældning i en petriskål. Her ses der med det blotte øje klart større flokke ved den højere dosering.

Prototype 2

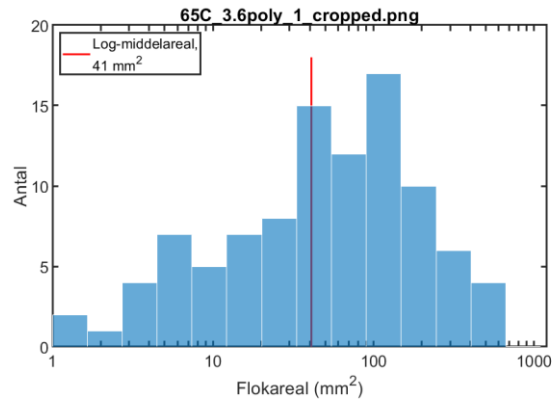
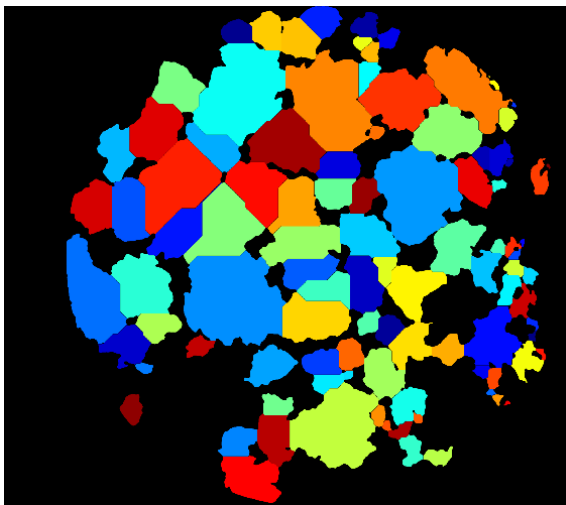
Efter den første forsøgsrække på Viborg Centralrenseanlæg blev tilsvarende forsøg udført på Hedensted Renseanlæg med samme resultat, dvs. ingen klar visuel forskel mellem flokke i det firkantede glas. Da der i Hedensted også blev observeret mere tydelig forskel på flokke, hvis de hældtes over i en petriskål, blev der under forsøgene bygget en ny prototype med henblik på at tage systematiske billeder af flokkene på denne måde. Prototypen ses i Figur 7, til venstre, mens et eksempel på et ophældte flokke er vist til højre i figuren.



Figur 7. Til venstre ses prototype 2 i form af en papkasse foret med hvidt papir, to LED-lister i hjørnerne og kameraet placeret fladt oven over petriskålen med flokke. Til højre ses et eksempel på et (tilklippet) billede af flokke efter ophældning i en petriskål. Det er her relativt let at skelne individuelle flokke.

Analysen af en række flokkuleringer med forskellig polymerdosering, gav klare indikationer af at prototypen var i stand til at give troværdige mål for flokstørrelser. Dog var det nødvendigt at benytte flere end et billede for at opnå tilstrækkelig sampling ved hver dosering. Et eksempel på de segmenterede flokke, efter databehandling, er vist i Figur 8, hvor de individuelle flokke ses til venstre. Til højre ses den størrelsesfordeling, der måles for flokkene.

De statistiske tests, der sammenligner karakteristika af fordelinger (fx middelværdi og spredning), bygger på en antagelse om mere end 5-10 tællinger i hver gruppe i histogrammet. Hvis datagrundlaget ikke opfylder dette, vil fx middelværdien i fordelingen ændre sig betragteligt mellem hver måling, selvom forsøgsparametrene holdes konstant. Når man opnår tilstrækkelig god sampling, ses dette blandt andet ved, at middelværdien ikke længere flytter sig, når man foretager yderligere målinger. Denne observation var med til at begrunde behovet for en videreudvikling af prototypen med en større prøvebeholder.



Figur 8. Til venstre ses de individuelle flokke, der blev fundet via analyse af billedet fra foregående figur. Hver individuel flok har sin egen tilfældige farve. Til højre ses det tilhørende histogram over flokarealer i billedet på en logaritmisk skala.

Prototype 3

På baggrund af erfaringerne fra de to første prototyper blev der designet en ny prototype med det formål at måle flokke på samme måde som i petriskålene, men samtidig opnå et bedre statistisk udgangspunkt for målingen. Dette blev konkret imødekommet ved at gøre det areal, der måles på, cirka fem gange større. Prototypen bestod i en metalramme med en glasplade i bund og top, adskilt af to lange plastpinde (se Figur 9).

Beholderen placeredes oven på en papkasse med et papirafdækket hul i toppen og to LED-lister i bunden. Kameraet placeredes igennem et hul i toppen af en anden papkasse, som passede ned over metalrammen. Dette afskærmede eksternt lys, og det var således kun lys fra LED-listerne i bunden, der kunne nå kameraet.

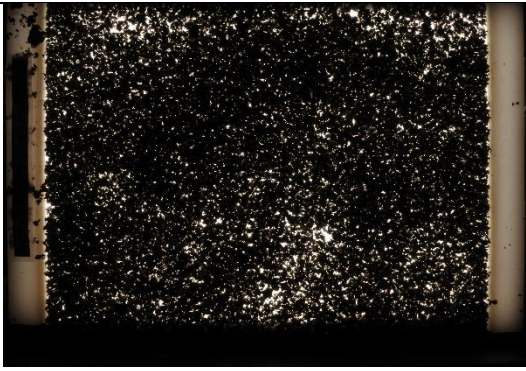
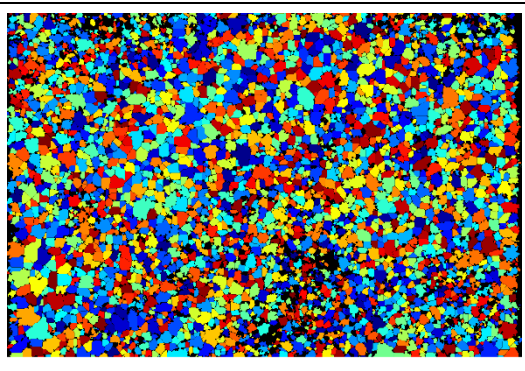

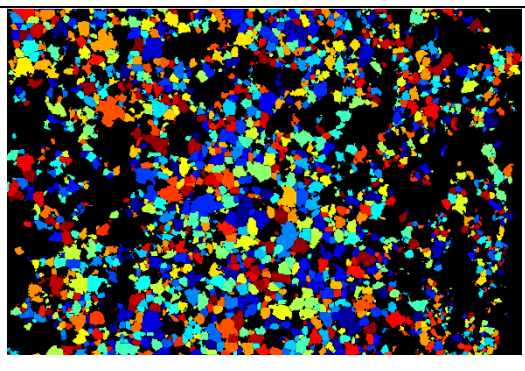

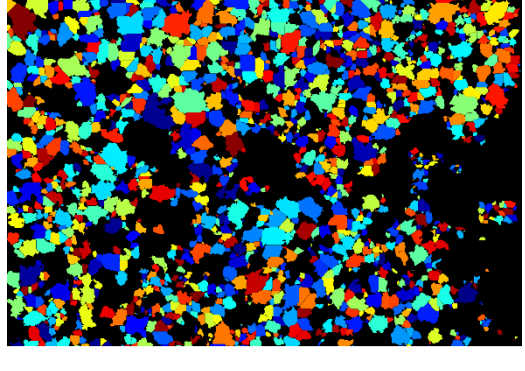


Figur 9. Prototype 3 designet til at opnå en flad udsprejning af flokke. Beholderen står på en kasse med to LED-lister i bunden og et hul i toppen, der er dækket af almindeligt printerpapir. Kameralinsen placeres i et hul i en anden papkasse (den hvide i baggrunden) som derefter placeredes oven på metalrammen for at blokere eksternt lys.

Denne prototype blev brugt i to nye feltforsøg på Hjørring Renseanlæg (som også benytter skruepresser fra Hjortkær Maskinfabrik, og som blev inddraget pga. midlertidige ombygninger i Viborg) og Viborg Centralrenseanlæg. Den primære læring fra Hjørring var, at der er behov for at fortynde flokkene med vand for at opnå en tilstrækkelig god adskillelse til, at de kan skelnes fra hinanden, samt at der skal benyttes identiske lysforhold og kamera-indstillinger for at opnå sammenlignelige billeder.

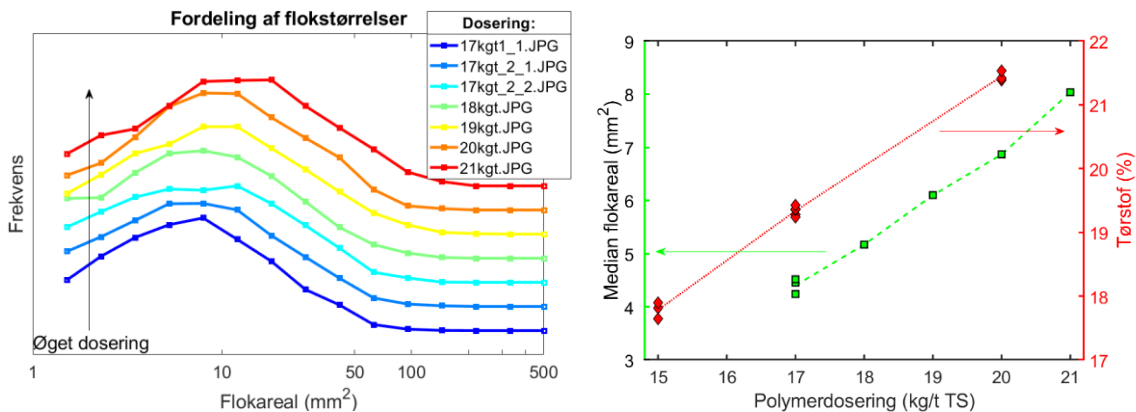
I forsøgsrækken i Viborg blev der eksperimenteret med polymerdoseringer fra 15 kg/t TS til 21 kg/t TS, og der blev udført flere gentagelser ved samme dosering for at undersøge, hvor stor variation der er mellem enkeltmålinger ved samme driftsbetingelser. Tre eksempler på billeder af flokke, fotograferet med prototype 3, er vist i Tabel 1, sammen med tilhørende billeder der illustrerer de individuelle flokke.

Tabel 1. Til venstre rå billeder som eksempler på billedfeltet fra denne prototype. Til højre kunstigt farvelagte flokke efter segmentering i MATLAB ved tre forskellige doseringer som eksempler på afbildning af de opnåede flokke efter databehandling. I det fulde forsøg er der udtaget flokke ved 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 og 21 kg/t TS over i alt 10 prøvetagninger. Forsøg 1, 9 og 10 blev alle udført med en dosering på 17 kg/t TS for at undersøge graden af variation ved konstante driftsbetingelser.

Forsøg	Rå data	Individuelle flokke
6 (15 kg/t)		
8 (17 kg/t, 1)		
5 (21 kg/t)		

De opnåede størrelsesfordelinger for flokkene ved forskellige doseringer i Viborg er vist i Figur 10, til venstre, mens median-flokarealet for hver dosering er vist i Figur 10, højre (grønne punkter). Her ses det, at flokkene bliver større, i takt med at doseringen stiger, hvilket man også klart kan fornemme på billederne i

Tabel 1. Under disse forsøg blev der også udtaget tørstofprøver, og tørstofvariationen som funktion af polymerdosering kan ses i Figur 10, til højre. Medianværdien af flokstørrelserne er ligeledes plottet i samme figur, og det kan ses, at både tørstof og flokstørrelse øges, i takt med at doseringen sættes op. De tre prøveudtag ved 17 kg/t TS giver alle samme resultat, selvom de er kørt som hhv. 1., 9. og 10. forsøg med de øvrige doseringer ind imellem.



Figur 10. Venstre: Fordeling af flokstørrelser (tværsnitsarealer) på en logaritmisk skala. Fordelingerne er forskudt for at man lettere kan følge udviklingen som funktion af dosering. Højre: Medianværdi af flokarealerne, afbilledet på en lineær skala (grøn), samt tørstofprocent efter afvandning versus polymerdosering (rød). Tørstofmålingerne ved 15 og 20 kg/t TS er udført som tre gentagelser, mens målingerne ved 17 kg/t TS er udført som tre gentagelser på to forskellige prøver.

Prototype 4 – Den endelige version

Konklusionen på forsøgsrækkerne i Hjørring og Viborg blev, at prototypens design fungerede tilfredsstillende, og derfor blev det besluttet at konstruere en mere robust version i træ til brug i fuldskalaforsøgene. Denne er vist i Figur 11, hvor den nederste kasse huser de to LED-liste, hullet nu er dækket med dampspærre, og der er monteret vinkelbeslag, som sikrer, at glas/metal-beholderen altid placeres det samme sted under kameraet. Den øverste kasse har stadig til opgave at afskærme eksternt lys og holde kameraet fast.

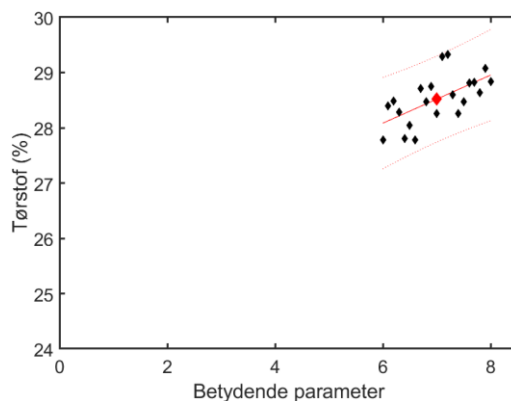


Figur 11. Den fjerde, og endelige, prototype. Venstre: Den nederste del, der indeholder to LED-liste, et hul dækket af dampspærre og beslag, der sikrer konsistent placering af beholderen til flokke. Højre: Den samlede opstilling med den øverste kasse, der holder kameraet.

Statistisk modellering

Under de længerevarende fuldskalaforsøg, der vil blive beskrevet i de følgende to sektioner, er der målt et større antal driftsparametre. For alle disse parametre ønskes det undersøgt, om de har signifikant sammenhæng med det endelige tørstofindhold i det afvandede slam. Den simpleste antagelse, der kan gøres for, om en parameter (fx pH) har relation til tørstofindholdet, er en lineær sammenhæng – altså, at tørstofprocenten kan beskrives som en ret linje i et plot af tørstofindhold *versus* den pågældende parameter. Hvis denne linje har en hældning, der er statistisk signifikant forskellig fra nul, så er der en relation mellem parameteren og afvandringsresultatet, men hvis linjens hældning ikke er signifikant forskellig fra nul (altså, hvis den er flad), så er der ingen sammenhæng med parameteren.

Den mest meningsfulde måde at beskrive sammenhængen er at centrere data og måle linjens værdi og hældning ved middelværdien \bar{x} for parameter x . Dette er illustreret i Figur 12 for simulerede data for tørstof *versus* en betydende parameter. Dette leder til en meget let fortolkning af hældningen – nemlig at hældningen angiver, hvordan tørstofindholdets sammenhæng er med den givne parameter, ud fra den gennemsnitlige værdi af denne parameter.



Figur 12. Plot af simulerede data (sort), hvor der er sammenhæng mellem en betydende parameter og tørstofindhold, samt illustration af en lineær model (rød fuldt optrukket linje) baseret på disse data. Linjen beskrives ud fra dens værdi A , centreret på middelværdien af pH, \bar{x} . De stiplede linjer angiver usikkerheden på, hvor nye data vil falde omkring linjens position.

Den model, der benyttes for, hvorledes tørstofindhold afhænger af en parameter x , bliver således:

$$Tørstof(\%) = A(\bar{x}) + B(x - \bar{x})$$

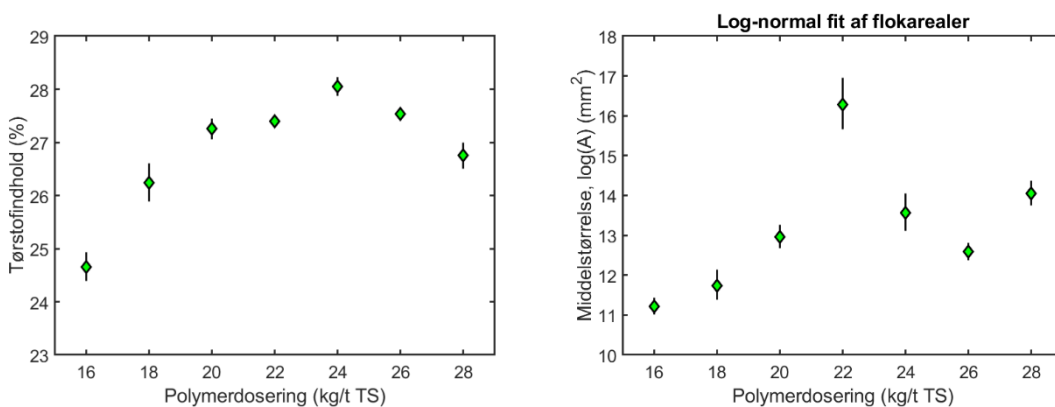
hvor $A(\bar{x})$ repræsenterer tørstofindholdet ved middelværdien af parameter x , og B repræsenterer, hvor meget tørstofindholdet påvirkes, når parameteren x ændres væk fra middelværdien.

I tabellerne, hvor de statistiske modeller for de målte parametre testes, er der for hver parameter angivet en "signifikans". Jo tættere denne værdi er på 1, jo mere signifikant er korrelationen mellem tørstof og den pågældende parameter. Signifikans er beregnet som 1 minus p -værdien for modellen med $B \neq 0$, hvor p -værdien angiver sandsynligheden for at observere de samme data, hvis B rent faktisk er nul. En høj signifikans (lav p -værdi) angiver

ver således, at det er usandsynligt, at man ville få de målte data, hvis den pågældende parameter ikke havde nogen indflydelse på tørstofindholdet. Det typiske cut-off for, om en parameter betragtes som signifikant, er 0,95.

Indledende forsøg, Viborg

Inden de længerevarende fuldskalaeksperimenter i Viborg, blev der i september 2018 udført en særskilt forsøgsrække i Viborg med henblik på at evaluere, om ændringer i polymerdoseringen medfører tilstrækkeligt store ændringer i slamflokkenes størrelse målt med den daværende prototype. Desuden var formålet at eftervise, hvad der sker ved overdosering af polymer. Igennem forsøgsrækken blev doseringen øget støt fra 16 kg/t TS til 28 kg/t TS, mens der blev udtaget prøver til måling af tørstofindhold i det afvandede slam og af flokke til målinger af disses størrelser. Figur 13, venstre, viser det målte tørstofindhold *versus* dosering, mens Figur 13, højre, viser flokstørrelsen *versus* dosering.

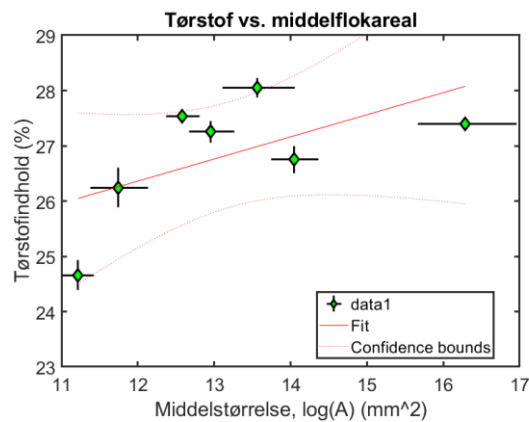


Figur 13. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam *versus* polymerdosering. Data antyder, at der nås et maksimum i tørstofindhold, når doseringen kommer over 20 kg/t TS, og at der kan være antydning af, at tørstofindholdet falder igen ved 28 kg/t TS. Højre: Flokstørrelse *versus* polymerdosering.

Erfaringsmæssigt forventes det, at tørstofindholdet igen vil falde ved ekstrem overdosering, og det sidste målepunkt ved 28 kg/t understøtter dette til en vis grad. Der er ikke udført forsøg ved høj nok dosering til, at den forventede udvikling entydigt kan bekræftes, ligesom det ikke kan afgøres, hvor "bredt" et optimum i tørstof der er tale om.

Ligeledes var der to hypoteser for flokkenes opførsel: Enten at flokstørrelserne ville nå et plateau ved overdosering, eller alternativt at flokstørrelserne ville nå et maksimum og derefter falde igen. De målte data giver ikke umiddelbart mulighed for at drage en klar konklusion om, hvilken hypotese der er bedst, primært pga. den kraftige peak ved en dosering på 22 kg/t TS.

Hvis både tørstofindhold og flokstørrelse udviser samme opførsel ved overdosering, hvad enten denne opførsel er et plateau eller et fald efter et maksimum, så bør et plot af tørstofindhold *versus* flokstørrelse udvise en lineær korrelation på samme vis som under fuldskalaforløbene (hvor variationen i dosering ikke var nær så stor). Et plot af tørstofindhold *versus* flokstørrelse for denne forsøgsserie ses i Figur 14 sammen med en lineær model for en sammenhæng mellem de to. Denne model finder en hældning på $0,40 \pm 0,24$, med en signifikans på 0,84, altså under projektets signifikanskrav. Det blev vurderet, at dette resultat enten kunne skyldes det lille datagrundlag, eller at antagelsen om en lineær sammenhæng i dette område ikke er valid, hvorfor sammenhængen blev undersøgt yderligere i fuldskalaforløbene.



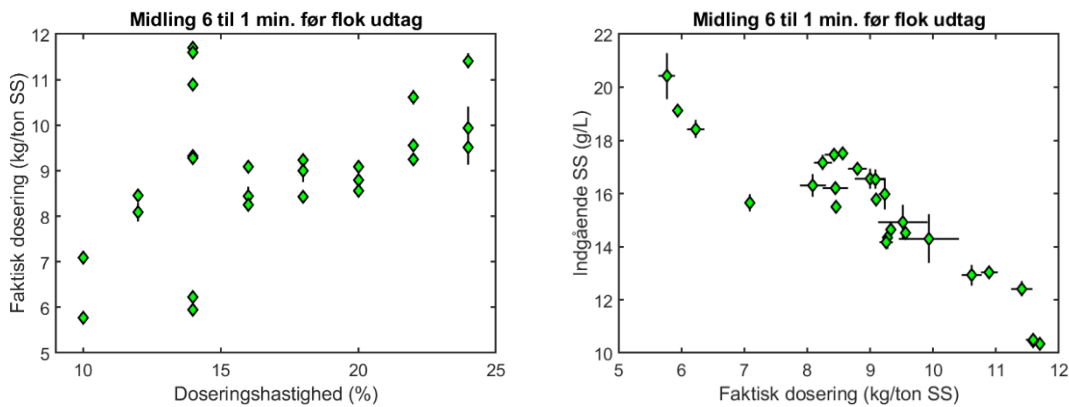
Figur 14. Tørstofindhold i det afvandede slam versus flok størrelse med tilhørende lineær model.

Indledende forsøg, Hedensted

Inden de længerevarende fuldskalaforsøg i Hedensted blev der i starten af november også her udført en forsøgsrække over to dage for at sikre, at prototypen virkede som ønsket. I denne forsøgsrække blev der skruet på doseringshastigheden på polymerpumpen, hvilket har ledt til forskellige faktiske doseringer (se umiddelbart nedenfor). Der blev udtaget flokke og trukket procesparametre på samme måde, som det senere blev gjort under de længerevarende fuldskalaforsøg, og der blev udtaget et mindre antal tørstofprøver ved de forskellige doseringshastigheder. De benyttede procesudtræk er på minutbasis, og for at sikre så god korrespondance mellem procesparametre, opholdstider og udtagne prøver som muligt er de målte procesværdier midlet over et tidsrum fra 6 minutter før til 1 minut efter hver tilhørende prøvetagning for flokke, og over et tidsrum fra 11 minutter før til 1 minut efter hver tilhørende prøvetagning for tørstof. Den tidsmæssige forskel for midlingen skyldes, at der er forskellige opholdstider for flokkene efter polymerdosering og dekanter og for slammet inde i dekanteren.

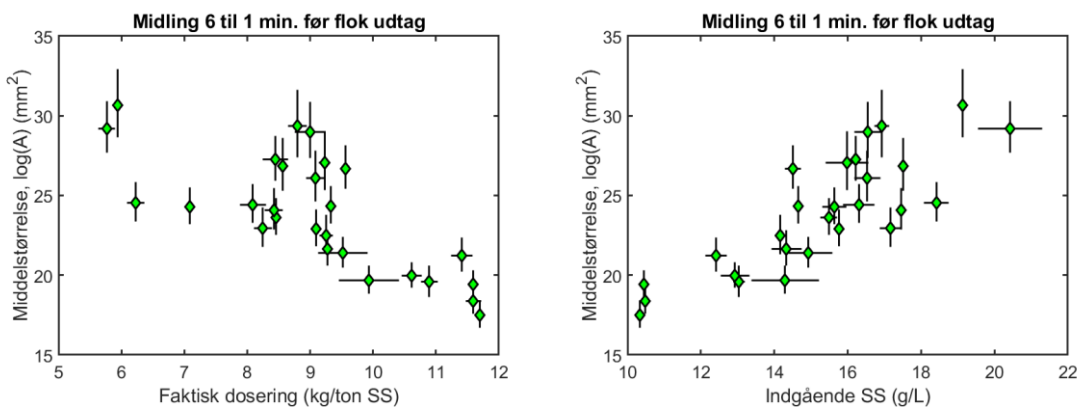
I Hedensted styres afvandingen med en konstant pumpehastighed for polymer, uafhængigt af tørstofindhold (SS-indhold) i det indgående slam. Dette resulterer i en dosering, der ikke er konstant ved hvert slampumpeflow, hvilket kan ses i Figur 15, venstre. Her vises den faktiske dosering per ton SS, der *de facto* er blevet benyttet, i forhold til de forskellige doseringshastigheder. Den faktiske dosering per ton SS har varieret fra 5 kg/t SS til 12 kg/t SS bl.a. ved den standardindstilling, der blev benyttet under disse forsøg (14 %).

Den konstante polymerpumpehastighed medfører, at der benyttes højere dosering, når den indgående SS er lav, og lavere dosering, når den indgående SS er høj, *selvom* der ikke ændres på doseringshastigheden. Dette er særlig tydeligt i Figur 15, højre, hvor det indgående SS-niveau er vist *versus* den faktiske dosering. Det ses her, at der er en kraftig negativ korrelation mellem de to parametre, så der benyttes høj dosering, når SS-niveauet er lavt, og lavere dosering, når SS-niveauet er højt.



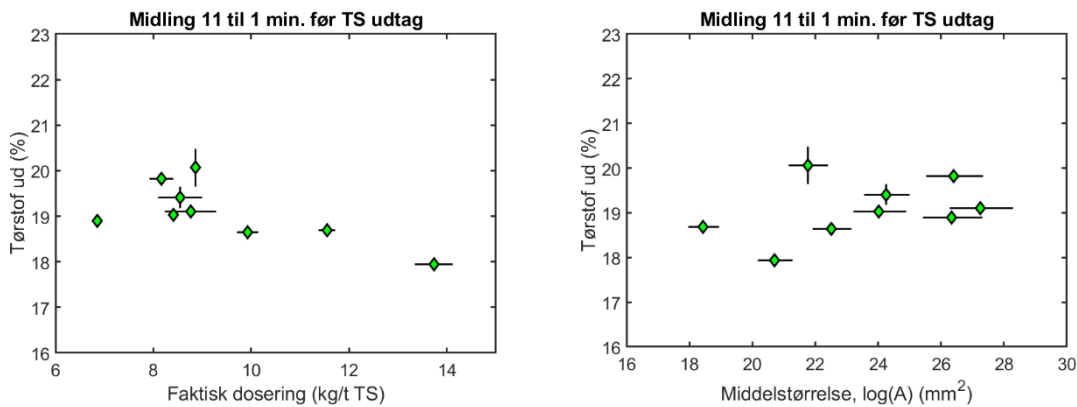
Figur 15. Venstre: Faktisk dosering versus doseringshastighed i styringen. Der er udført forsøg ad flere omgange ved en doseringshastighed på 14 %, og over de to dages forsøg er der stor variation i den faktiske dosering her, selvom styringen kan give indtryk af, at niveauet skulle være konstant. Højre: Indgående SS-niveau versus faktisk dosering. Der bruges høj dosering ved lav SS og omvendt.

Figur 16 viser den målte flokstørrelse *versus* den faktiske dosering (venstre) og det indgående SS-niveau (højre). Her ses det, ret overraskende, at flokstørrelsen korrelerer negativt med dosering (signifikans 1,0), altså at flokkene bliver mindre ved højere faktisk dosering, hvilket tyder på, at der er tale om en overdosering, som medfører mindre flokstørrelse. Omvendt ses det, at flokstørrelse og SS-niveau korrelerer positivt (signifikans 1,0), og at høje SS-niveauer ind i afvandingen lader til at resultere i store flokke.



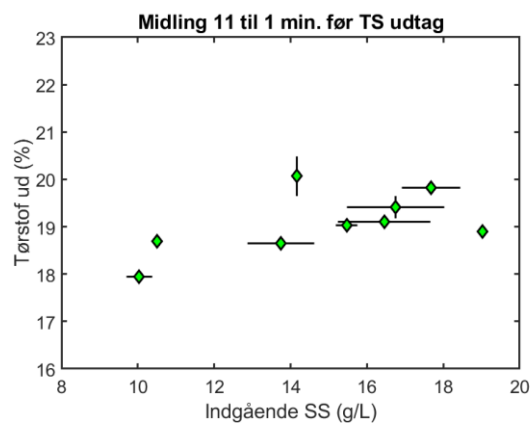
Figur 16. Venstre: Flokstørrelse versus faktisk dosering. Parametrene korrelerer negativt, og højere dosering medfører derfor mindre flokke. Højre: Flokstørrelse versus indgående SS-niveau. Parametrene korrelerer positivt, og højere SS-niveau leder derfor til større flokke.

Figur 17 viser det målte tørstofindhold efter afvanding *versus* faktisk dosering (venstre) og flokstørrelse (højre). Tørstofindholdet faldt i disse forsøg ved meget høje faktiske doseringer (i de senere fuldskalaforsøg var den højeste faktiske dosering ca. 9 kg/ton SS), med en signifikans på 0,96. Samtidig korrelerede tørstofindholdet efter afvanding ikke signifikant med flokstørrelse.



Figur 17. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus faktisk dosering. Der er stor variation i tørstofindholdet ved doseringer omkring 9 kg/t SS, mens højere doseringer leder til lavere tørstofindhold. Højre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus flok størrelse.

Figur 18 viser det målte tørstofindhold i det afvandede slam *versus* indgående SS-indhold. Der blev her ikke fundet signifikant korrelation (0,89).



Figur 18. Tørstofindhold i det afvandede slam versus indgående SS-indhold.

Disse indledende forsøg i Hedensted, kombineret med de tilsvarende forsøg i Viborg, viste, at den nyudviklede kamerateknologi kan måle flok størrelserne på en konsistent måde. Resultaterne i Viborg indikerede desuden, at teknologien havde potentiale til at optimere tørstofindholdet i det afvandede slam. Teknologien blev derfor testet over en længere periode i fuldskalaforsøg på begge anlæg.

Fuldskalaforsøg på Viborg Centralrenseanlæg

Fuldskalaforsøgene i Viborg er foregået over to perioder: 23. oktober til 2. november, 2018 og 12. til 26. november, 2018. I disse perioder er der forekommet let nattefrost i Midt- og Vestjylland d. 27. og 28. oktober, 17. og 18. november og 25. og 26. november, mens dagtemperaturen alle dage har ligget over frysepunktet.¹ Der er i perioden arbejdet med rådnetankens drift, og doseringen af polyaluminiumklorid (koagulant) er fordoblet i den anden periode. Effekten af disse ændringer er ikke blevet undersøgt særskilt.

I Viborg er følgende parametre undersøgt sammen med tørstofindhold i det afvandede slam:

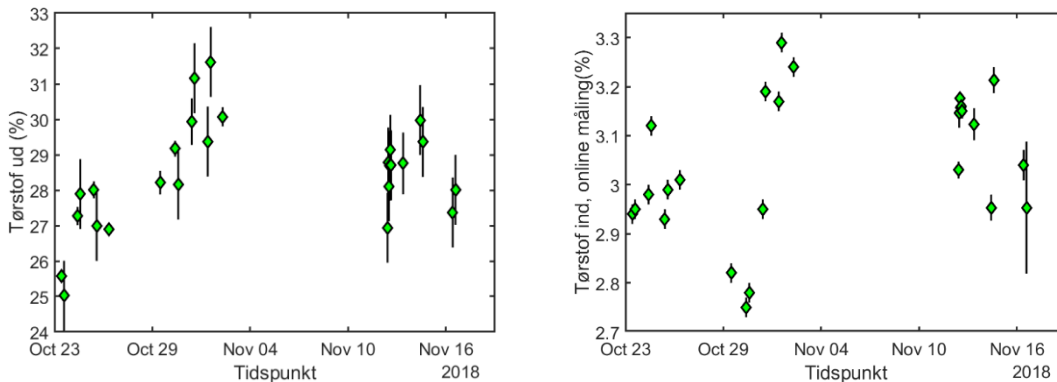
- Dosering (sætpunkt i styring)
- Tørstof i indgående slam (onlinemåling og måling på udtaget prøve i laboratorie)
- Flokstørrelse (bestemt via billeder)
- Orthophosphat (udtaget prøve målt med LCK349-testkit, Hach-Lange)
- Moment i skruepresse (procesudtræk hvert 10. minut)
- Glødetab i det afvandede slam (udtaget prøve tørret ved 105 °C i mindst 20 timer, afkølet i eksikator 1 time, vejet og glødet ved 550 °C i 2 timer)
- Klorid i indgående slam (udtaget prøve målt med LCK311-testkit, Hach-Lange)
- pH i indgående slam (elektrodemåling i udtaget prøve).

Alle prøver er udtaget efter polymerblandetanken og manuelt overført til kamerateknologien. For alle prøver udtaget til analyse er prøvetagningstidspunktet noteret, og de relevante procesudtræk er primært noteret manuelt. For momentet i skruepressen er der brugt den udlæsning, der er nærmest tidspunktet for tørstofprøvetagning. Dosering refererer til kg *aktiv* polymer, hvilket også er den enhed, der benyttes i styringen i Viborg.

Præsentation af data

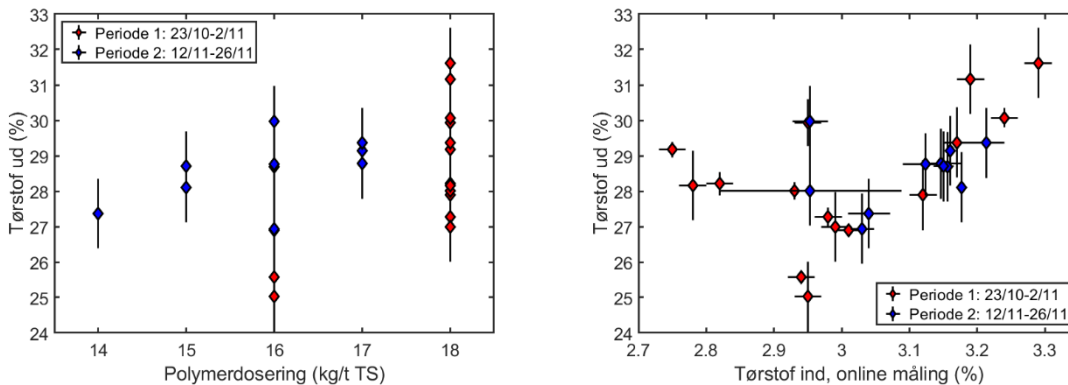
I Figur 19, venstre, vises det målte tørstofindhold over perioden på de tidspunkter, prøverne er udtaget. Tørstofindholdet i det afvandede slam varierer i perioderne fra 25,0 til 31,6 % med et gennemsnit over hele forsøgsperioden på 28,4 % og en standardafvigelse fra middelværdien på 1,5 %, igen over hele forsøgsperioden. Den relative variation fra middelværdien er således cirka 5 %. Tørstofindholdet i det indgående slam, registreret med onlinemålingen, er vist i Figur 19, højre.

¹ <https://www.dmi.dk/vejr/arkiver/vejrarkiv/> for Midt- og Vestjylland i oktober og november 2018.



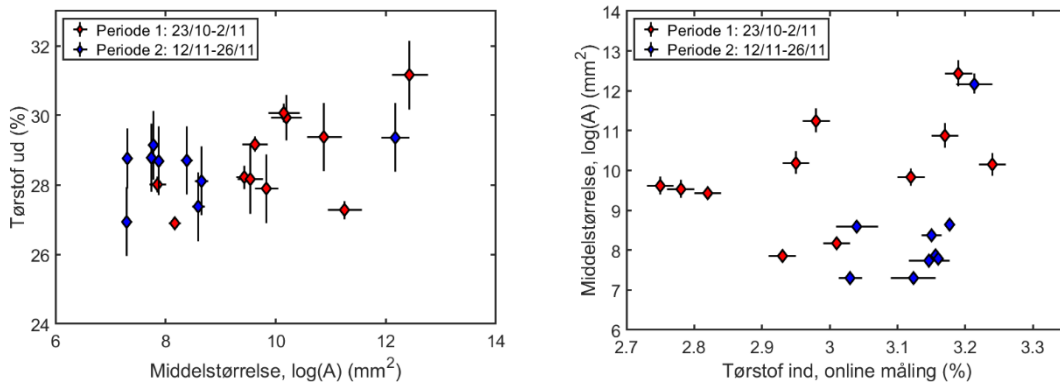
Figur 19. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus tidspunkt for prøvetagning hen over fuldskalaforøgsperioden. Højre: Tørstofindhold i det indgående slam versus tidspunkt. Målingen er i den første periode en punktnedskrivning af onlinemålingen, mens den i anden periode er trukket ud af procesmålingerne.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* dosering vises i Figur 20, venstre. Selvom dette plot indikerer, at dosering har en effekt på tørstofindhold, så ses det også, at der optræder større variationer i tørstofindhold ved *konstant* dosering over tid i den første periode end de variationer, der sker som følge af forskellig dosering i den anden periode. Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* onlinemåling af indgående tørstofindhold er vist i Figur 20, højre.



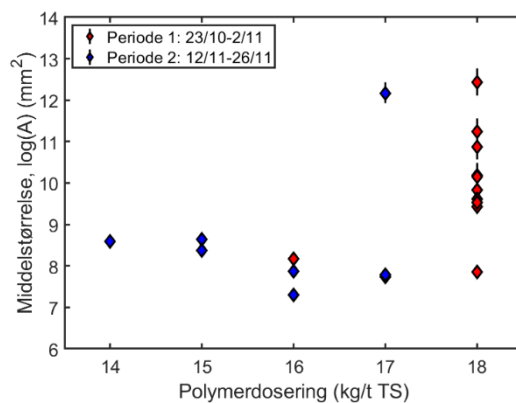
Figur 20. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus dosering af aktiv polymer. Bemærk, at der i den første periode ses store variationer i tørstofindholdet, selvom doseringen er konstant. Højre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus tørstofindhold i det indgående slam, registreret med onlinemålingen.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* den målte flokstyrrelse vises i Figur 21, venstre. Flokstyrrelse *versus* tørstofindholdet i det indgående slam vises i Figur 21, højre.



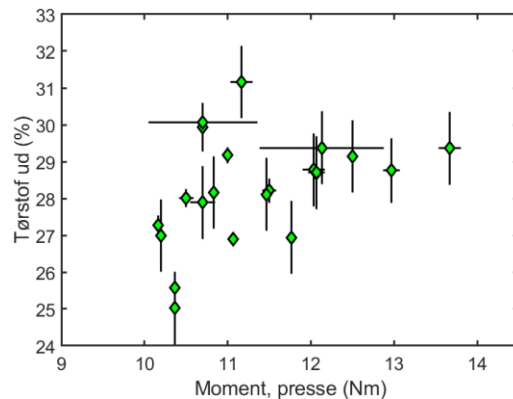
Figur 21. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus flokstørrelse. Højre: Flokstørrelse versus tørstofindhold i det indgående slam, registreret med onlinemålingen.

Den målte flokstørrelse *versus* dosering vises i Figur 22. I lighed med tørstofindholdet efter afvanding er det tydeligt, at den samme dosering ikke resulterer i den samme flokstørrelse over længere tidsperioder.



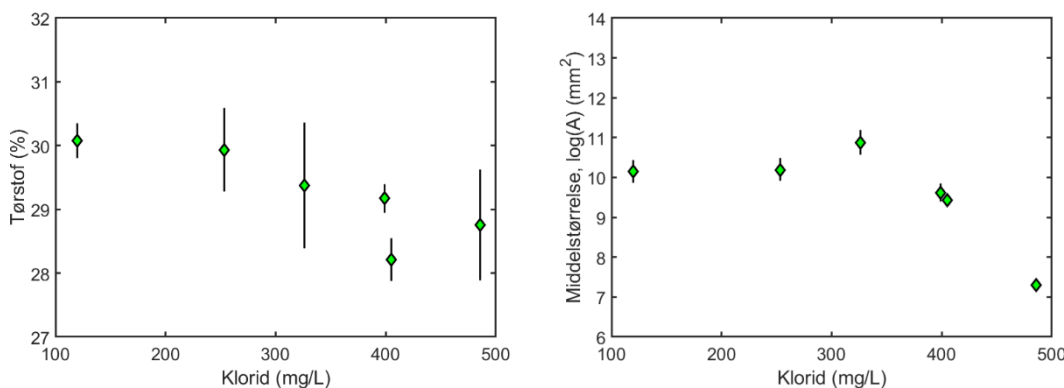
Figur 22. Flokstørrelse versus polymerdosering.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* momentet i skruenpressen vises i Figur 23. Her ses ligeledes en klar sammenhæng, hvor højere moment korrelerer med et højere tørstofindhold. Dette giver rimelig god mening fra et mekanisk synspunkt: jo mindre vand, der er i det afvandede slam, jo mindre elastisk forventes det at blive, hvormed det vil yde større modstand for sneglen i skruenpressen.



Figur 23. Tørstofindhold i det afvandede slam versus moment i skruepressen.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* kloridindhold i det indgående slam vises i Figur 24, venstre. Selvom der ikke er specielt mange målinger af kloridindhold hen over perioden, ser det ud til, at der antydningvis er en sammenhæng mellem højere kloridindhold og lavere tørstofindhold i det afvandede slam. Der kan være sammenhæng med det fænomen, at polymerer typisk vil krølle sammen ved højere ionstyrker pga. afskærmning af deres ladninger.



Figur 24. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus kloridindhold i det indgående slam. Højre: Flok størrelse versus kloridindhold i det afvandede slam. Alle målinger vist i begge figurer er kørt ved en dosering på 18 kg/t TS, bortset fra målingen ved det højeste kloridindhold, hvor doseringen var 16 kg/t TS.

Yderligere plot af tørstofindhold *versus* de resterende undersøgte parametre (ortho-phosphat, glødetab og pH) er vedlagt i Bilag I. For disse forsøg er der ikke fundet en signifikant sammenhæng med tørstofindhold i det afvandede slam.

Statistisk modellering af tørstof og undersøgte parametre

I Tabel 2 opgives resultatet af den statistiske modellering for samtlige undersøgte parametre. Der er fundet signifikante korrelationer med tørstofindhold i det indgående slam, flok størrelse, moment i pressen og kloridindhold i det indgående slam. Polymerdoseringen falder lige nøjagtig udenfor signifikanskravet på 0,95, og tolkningen af dette uddybes nedenfor.

Tabel 2. Målte parametre, deres observerede middelværdi og standardafvigelse fra middelværdien, det lineært modellerede tørstofindhold ved middelværdien og den lineært modellerede hældning af tørstofindholdet versus hver parameter, signifikansen af modellen med en hældning forskellig fra nul.

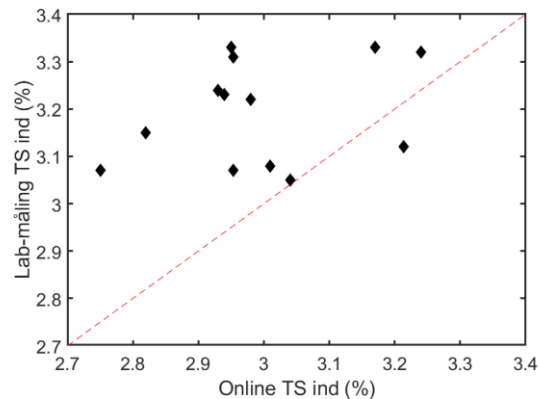
Målt parameter	Enhed	Middelværdi, \bar{X}	Standardafvigelse; $\sigma(\bar{X})$	Tørstof ved \bar{X} ; $A(\bar{X})$	Hældning; B	Signifikans ($1 - p$)
Dosering	kg/(t TS)	16,9	1,2	28,4 ± 0,3	0,48 ± 0,25	0,94
TS ind, online	%	3,05	0,14	28,4 ± 0,3	4,8 ± 1,9	0,98
TS ind, lab	%	3,19	0,11	28,4 ± 0,4	5,6 ± 3,4	0,87
Flokstørrelse	mm ²	9,26	1,6	28,6 ± 0,2	0,36 ± 0,14	0,98
Orthophosphat	mg/L	40,4	10	-	-	0,66
Moment	Nm	11,4	1,0	28,3 ± 0,3	0,63 ± 0,31	0,95
Glødetab	%	60,5	1,6	-	-	0,17
Klorid	mg/L	332	130	29,3 ± 0,2	- 0,005 ± 0,001	0,96
pH	-	7,52	0,12	-	-	0,76

Den mest signifikante sammenhæng mellem tørstof og nogen målt parameter ses ved flokstørrelse. Der observeres en positiv sammenhæng mellem flokstørrelse og tørstofindhold (større flokke giver mere tørt slam). Dette bekræfter den primære hypotese fra projektets start – at det har værdi at måle på flokstørrelse for bedre at forudsige tørstofindholdet i det afvandede slam. Det bør understreges, at denne rent lineære sammenhæng kun gælder i det undersøgte parameterområde og for den pågældende afvandingseenhed. I praksis er der således erfaring for, at flokkene kan blive så store, at de igen leder til et lavere tørstofindhold efter afvanding. Når dette ikke er observeret her, skyldes det højst sandsynligt, at der ikke er udført forsøg med så høje doseringer, at optimum er blevet kraftigt overskredet, jf. de indledende forsøg.

I udgangspunktet var det forventet at finde en signifikant sammenhæng mellem tørstofindhold og polymerdosering. Vi vurderer, at dette skyldes, at forsøgene er kørt over så lang en periode, at sammenhængen har ændret sig, hvilket er et kendt fænomen fra driften – altså at der ses ændringer i tørstofindhold ved konstant dosering. Dette er i den grad tydeligt i den første periode med fuldskalaforsøg i Viborg, hvor der ved en dosering på 18 kg/t TS blev observeret tørstofindhold i det afvandede slam mellem 27 % og 31,5 %.

Onlinemålingen af tørstofindholdet i det indgående slam udviser en signifikant positiv sammenhæng med tørstofindholdet efter afvanding. Dette gælder også, selvom polymerdoseringen holdes konstant, som det primært var tilfældet under den første forsøgsperiode. Resultatet er isoleret set overraskende, da man i udgangspunktet kunne forvente, at tørstofindholdet ville være konstant ved konstant dosering. I praksis er det et åbent spørgsmål, om sammenhængen med det målte tørstofindhold inden afvanding i virkeligheden dækker over en eller flere andre ændringer i slambetingelserne, som ikke er målt direkte.

Laboratoriemålingerne af tørstof i det indgående slam og tørstofindholdet målt online er vist i Figur 25. Her ses det, at der systematisk måles et højere tørstofindhold med laboratoriemetoden end online. Projektet har ikke noget godt bud på, hvad denne forskel skyldes.



Figur 25. Tørstofindhold i det indgående slam, målt i laboratoriet, versus onlinemåling af tørstof. Der måles systematisk højere tørstofindhold med laboratoriemetoden i forhold til onlinemålingen.

Kloridindholdet i det indgående slam har en signifikant negativ effekt på tørstofindholdet efter afvanding (højere kloridindhold giver lavere tørstofindhold). Det bemærkes her, at de statistiske tests tager højde for forholdet mellem antallet af datapunkter *versus* antallet af parametre i modellen, og at den målte effekt således er stærk nok til at kompensere for, at der kun er opnået brugbare resultater for klorid for seks prøver. Resultaterne synes således at indikere, at salt har en negativ effekt på flokkuleringen og dermed på tørstofindholdet efter afvanding. Dette stemmer umiddelbart godt overens med erfaringer fra driften, der viser et lavere tørstofindhold om vinteren end om sommeren.

Orthophosphat udviser ikke en signifikant effekt på tørstofindholdet efter afvanding. Inden projektet formodedes det, at exopolymerer, dannet i forbindelse med biologisk fosforfjernelse, ville have en negativ effekt på afvandingen, men dette kan ikke underbygges af de målte data. Plot af tørstof *versus* orthophosphat er vist i Bilag I.

Glødetabet i det afvandede slam udviser ikke en signifikant effekt på tørstofindholdet efter afvanding i det undersøgte område. Dette vurderes primært at skyldes, at der ikke har været specielt store udsving i glødetab hen over forsøgsperioden, da den praktiske erfaring fra branchen er, at glødetab også er en væsentlig parameter i forhold til afvandeligheden af slam.

pH i det indgående slam udviser ikke en signifikant effekt på tørstofindholdet efter afvanding i det undersøgte område.

Fuldskalaforsøg, Hedensted

Forsøgene i Hedensted er foregået over perioden 4. december til 13. december, 2018. I denne periode er der forekommet let nattefrost i Østjylland d. 4., 5. og 11.-13. december, mens dagtemperaturen alle dage har ligget over frysepunktet.² Der er ikke observeret signifikante ændringer i kloridniveauet i spildevandet over perioden.

I Hedensted er følgende parametre undersøgt sammen med tørstofindhold i det afvandede slam:

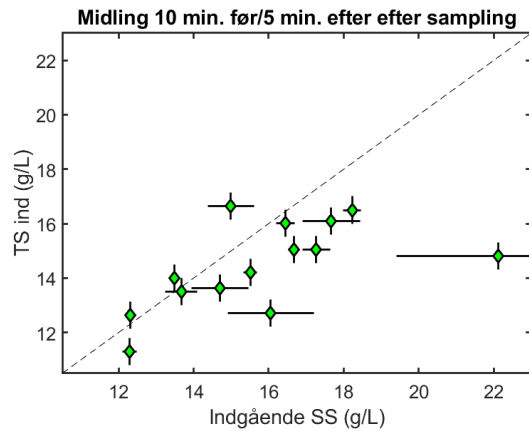
- Faktisk dosering (onlinemåling hvert minut)
- SS i indgående slam (onlinemåling hvert minut)
- Tørstof i det indgående slam (udtaget prøve målt i laboratorie)
- Tørstof i rejektvandet (udtaget prøve målt i laboratorie)
- Flokstyrrelse (bestemt via billeder)
- Orthophosphat (udtaget prøve målt med LCK311-testkit, Hach-Lange)
- Moment i dekanter (procesudtræk hvert minut)
- Omdrejningstal i dekanter (procesudtræk hvert minut)
- Klorid i indgående slam, efter filtrering (udtaget prøve målt med LCK350-testkit, Hach-Lange)
- pH i indgående slam (elektrodemåling i udtaget prøve)
- Konduktivitet i indgående slam (elektrodemåling i udtaget prøve).

Alle prøver er udtaget efter polymerdosering og før afvanding. Prøverne er manuelt udtaget og overført til kamerateknologien. For alle prøver udtaget til analyse er prøvetagnings-tidspunktet noteret, og de relevante procesudtræk er herefter fundet som gennemsnit over et tidsrum fra 10 minutter før til 5 minutter efter prøvetagning. Den faktiske dosering refererer til kg *aktiv* polymer og er beregnet ud fra den loggede vægtændring af polymertanken, den aktive polymerandel (48 %), det totale flow ind i dekanteren og onlinemålingen af SS i indgående slam.

Præsentation af data

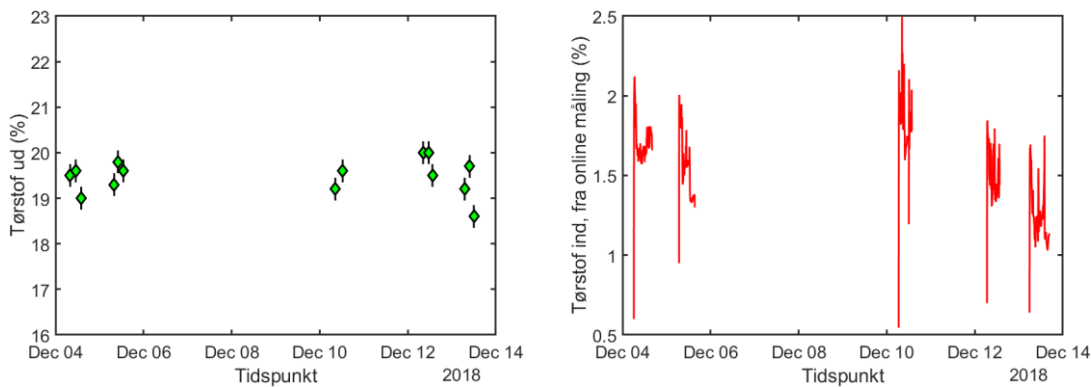
I Figur 26 vises sammenhængen mellem onlinemålingen af SS-indhold i det indgående slam og laboratiormåling af tørstofindholdet i prøver af det indgående slam igennem forsøgsperioden. Da der i store træk er en 1:1-korrespondance mellem de to værdier, antages dette for værende repræsentativt, og de resterende udregninger for indgående slam og polymerdosering opgives i forhold til tons TS, for at lette sammenligning med resultaterne fra Viborg, selvom det der faktisk er målt, er SS.

² <https://www.dmi.dk/vejr/arkiver/vejrarkiv/> for Østjylland i november og december 2018.



Figur 26. Laboratiormåling af tørstofindhold i det indgående slam *versus* onlinemåling af SS-indhold i det indgående slam. Punkterne er fordelt igennem hele forsøgsperioden.

I Figur 27, venstre, vises det målte tørstofindhold over perioden på de tidspunkter, prøverne er udtaget. Tørstofindholdet i det afvandede slam varierer meget lidt over perioden, med et gennemsnit på 19,5 % og en standardafvigelse på 0,4 %. Den relative variation fra middelværdien er således cirka 2 %. Tørstofindholdet i det indgående slam i samme periode er vist i Figur 27, højre. Dette plot illustrerer, dels at det gennemsnitlige tørstofindhold varierer relativt meget mellem hver afvandingskørsel, dels at tørstofindholdet typisk falder langsomt gennem en afvandning.

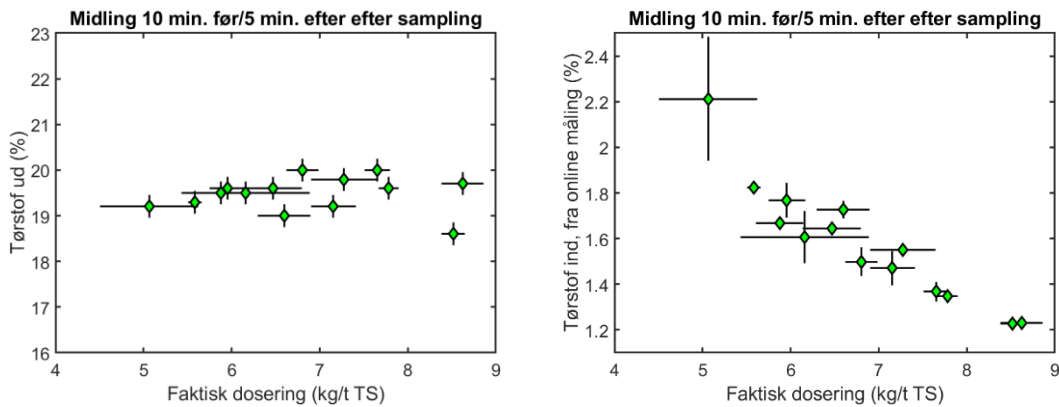


Figur 27. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus tidspunkt for prøvetagning hen over fuldskala-forsøgsperioden. Højre: SS-indhold i det indgående slam versus tidspunkt. Der er kun vist værdier fra tidspunkter, hvor dekanteren har været i brug.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* den faktiske dosering vises i Figur 28, venstre. Dette plot viser, at den faktiske dosering (i det undersøgte område) har en meget begrænset effekt på tørstofindholdet i det afvandede slam. Dette bekræftes også i den statistiske analyse (se nedenfor).

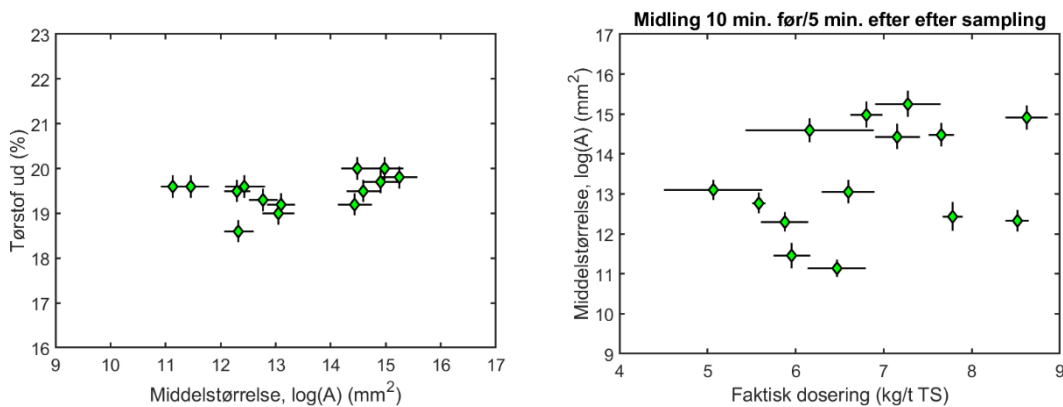
Som nævnt under afsnittet om de indledende forsøg styres afvandingen i Hedensted med en konstant pumpehastighed på polymertanken, uafhængigt af tørstofindhold i det indgående slam. Dette har resulteret i en faktisk dosering i forhold til indgående TS, der har varieret fra 5 kg/t TS til 8,6 kg/t TS i forsøgsperioden. Dette er en variation på ± 26 %

omkring gennemsnittet. Den konstante pumpehastighed har, som under de indledende forsøg, resulteret i, at der benyttes højere dosering, når det indgående tørstofindhold er lavt, og lavere dosering, når det indgående tørstofindhold er højt, se Figur 28, højre.



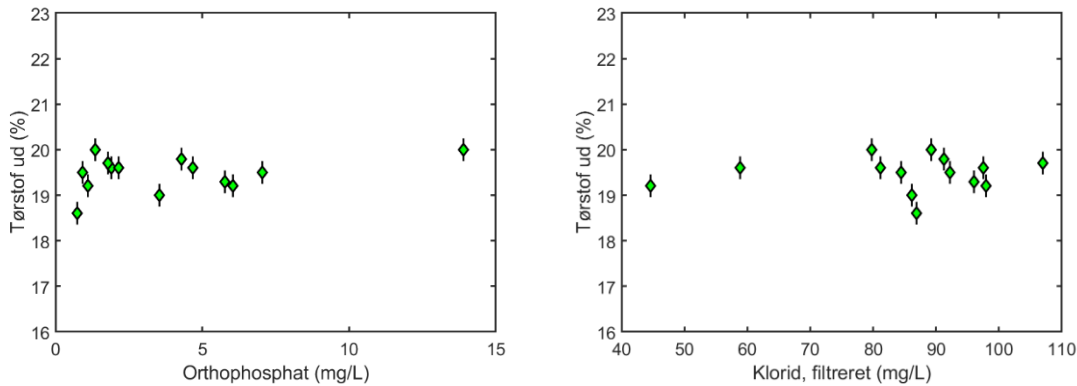
Figur 28. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam *versus* faktisk dosering af aktiv polymer. Der observeres kun en relativ variation på $\pm 2\%$ i tørstofindhold, selvom doseringen varierer med $\pm 26\%$. Højre: Tørstofindhold i det indgående slam *versus* faktisk dosering af aktiv polymer. Den kraftige negative korrelation mellem TS og dosering skyldes kombinationen af konstant polymerpumpehastighed og varierende tørstofindhold.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* den målte flokstørrelse vises i Figur 29, venstre. I lighed med plottet af tørstof *versus* dosering observeres der en større variation i observeret flokstørrelse, mens tørstofindholdet ikke har vist store udsving. Sammenhængen mellem dosering og flokstørrelse er plottet i Figur 29, højre. Her observeres det, at der er stor spredning i flokstørrelse ved den samme faktiske dosering.



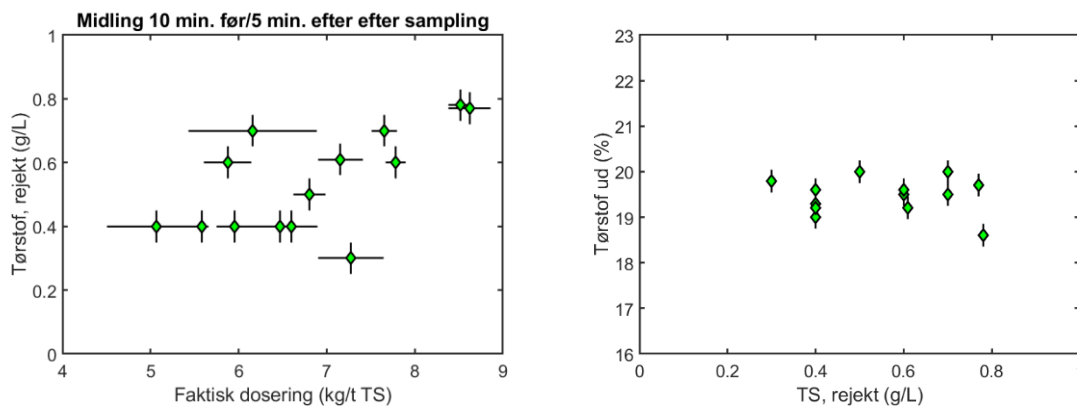
Figur 29. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam *versus* flokstørrelse. Højre: Flokstørrelse *versus* faktisk dosering.

Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* orthofosfat i det indgående slam vises i Figur 30, venstre. I gennemsnit er niveauet i Hedensted en faktor 10 lavere end i Viborg. Det opnåede tørstofindhold i det afvandede slam *versus* kloridindhold i det indgående slam, efter filtrering, vises i Figur 30, højre. Det maksimale, målte kloridindhold i Hedensted er en faktor 5 lavere end i Viborg.



Figur 30. Venstre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus orthophosphat i det indgående slam. Højre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus kloridindhold i det indgående slam, efter filtrering.

Tørstofindholdet i rejektvandet *versus* den faktiske polymerdosering er vist i Figur 31, venstre. Der observeres ikke signifikant dårligere rejektvandskvalitet ved høje doseringer end ved lave doseringer i det område, der er målt, på trods af at dette var forventet. Der observeres heller ikke nogen sammenhæng mellem tørstofindholdet i det afvandede slam og rejektvandskvaliteten, se Figur 31, højre.



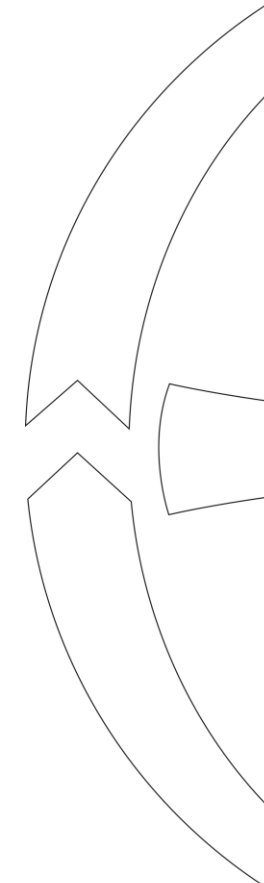
Figur 31. Venstre: Tørstofindhold i rejektvandet versus faktisk dosering. Højre: Tørstofindhold i det afvandede slam versus tørstofindhold i rejektvandet.

Yderligere plot af tørstofindhold *versus* de resterende undersøgte parametre (SS i indgående slam, moment i dekanteren, omdrejningstal i dekanteren, pH i det indgående slam og konduktivitet i det indgående slam) er vedlagt i Bilag II.

Statistisk modellering af tørstof og undersøgte parametre

I

Tabel 3 opgives resultatet af den statistiske modellering for samtlige undersøgte parametre. Der er ikke opnået signifikans over 0,95 for nogen af de målte parametre i forhold til deres indflydelse på tørstofindholdet i det afvandede slam, i modsætning til resultaterne for forsøgene i Viborg. Dette vurderes primært at skyldes, at tørstofindholdet i det afvandede slam har varieret meget lidt i forsøgsperioden.



Tabel 3. Målte parametre, deres observerede middelværdi og standardafvigelse fra middelværdien, det lineært modellerede tørstofindhold ved middelværdien og den lineært modellerede hældning af tørstofindholdet versus hver parameter samt signifikansen af modellen med en hældning forskellig fra nul.

Målt parameter	Enhed	Middelværdi, \bar{X}	Standardafvigelse; $\sigma(\bar{X})$	Tørstof ved \bar{X} ; $A(\bar{X})$	Hældning; B	Signifikans ($1 - p$)
Faktisk dosering	kg/(t TS)	6,82	1,07	-	-	0,07
SS ind	g/L	15,8	2,6	-	-	0,37
TS ind	g/L	14,4	1,6	19,5 ± 0,1	0,08 ± 0,07	0,77
Flokstørrelse	mm ²	13,4	1,4	19,5 ± 0,1	0,11 ± 0,07	0,84
Orthophosphat	mg/L	3,9	3,5	19,5 ± 0,1	0,037 ± 0,030	0,76
Moment 2	Nm	27,7	1,5	-	-	0,10
Omdrejninger 2	rpm	264	12	-	-	0,13
TS, rejekt	g/L	0,54	0,16	-	-	0,28
Klorid, filtreret	mg/L	85	16	-	-	0,26
pH	-	6,51	0,10	-	-	0,40
Konduktivitet	µS/cm	670	118	-	-	0,16

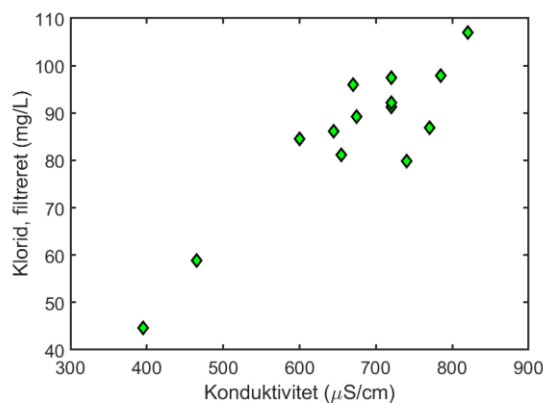
Der er ikke signifikant sammenhæng mellem tørstof og den benyttede, faktiske dosering (meget lav signifikans på 0,07). Dette antyder, at man kunne få et lige så godt driftsresultat ved at fastholde den laveste faktiske dosering på 5 kg/t TS, og derved *i gennemsnit* spare 26 % på polymerforbruget, hvilket ville være meget interessant at efterprøve i praksis.

Der er ikke observeret signifikant sammenhæng mellem tørstofindhold efter afvandning og flokstørrelse (signifikans 0,84), og det er projektets vurdering, at dette ikke skyldes en mangel ved teknologien, men snarere at det doseringsinterval, der er ramt i forsøgsperioden, indrammer et bredt optimum i tørstofindhold, inden for hvilken afvandingsresultatet og flokstørrelsen kun responderer meget svagt på ændringer. Dette reflekteres også i, at tørstofindholdet i rejektvandet ikke udviser nogen sammenhæng med hverken tørstof eller dosering i det undersøgte område.

Der er heller ikke observeret signifikant sammenhæng mellem flokstørrelse og den benyttede, faktiske dosering (signifikans 0,74). Dette kunne skyldes manglende opblanding og/eller for kort tid til flokdannelse, da der går mindre end 1 sekund, fra polymeren møder slammet, til det passerer den hane, hvor flokkene udtages lige inden dekanteren. Det virker ikke usandsynligt, at så kort opblandingstid kan give anledning til en mindre god flokkulering. Ydermere benyttes der i Hedensted ikke modnetanke til at "udfolde" polymeren, inden den doseres ind i slammet, hvilket også må forventes at have en negativ effekt på flokkuleringen.

Der er ikke signifikant sammenhæng mellem tørstofindhold og kloridindhold i det indgående slam i det målte område, men der er heller ikke målt specielt høje kloridniveauer i forsøgsperioden. Det kan således ikke udelukkes, at markant højere kloridindhold kunne lede til lavere tørstofindhold i det afvandede slam.

Der er ligeledes ikke signifikant sammenhæng mellem tørstofindhold og konduktivitet i det indgående slam i det målte område. Dette kan forklares ved at sammenligne konduktivitet og kloridindhold i det indgående slam, vist i Figur 32. Her ses det, at de to målinger korrelerer meget stærkt med hinanden, og når kloridindhold ikke influerer tørstofindhold, er det derfor forventeligt at få samme resultat for konduktivitet. Inden projektets start blev det vurderet, at det kunne have værdi at måle på konduktivitet som proxy for kloridindhold, og derefter bruge dette som et yderligere input i styringen af afvanding. Den første del, at kunne bruge konduktivitet som mål for kloridindhold, kan lade sig gøre, men den anden del, at bruge konduktivitet til at styre afvandingen, vurderes ikke at have værdi.



Figur 32. Kloridindhold i det indgående slam, efter filtrering, versus konduktivitet i det indgående slam.

pH i det indgående slam udviser ikke en signifikant sammenhæng med tørstofindholdet efter afvanding i det undersøgte område.

Samlede konklusioner, kameraopstilling

Der er udviklet en kameraprototype, der er i stand til at måle flokstørrelser i flokkuleret slam offline. Prototypen er brugt til at måle flokstørrelser ved en række forskellige driftsforhold på Viborg Centralrenseanlæg og Hedensted Renseanlæg. Flokkene i Hedensted, hvor der køres med aktivt slam, er cirka 30 % større end i Viborg, hvor der køres med udrådnet slam.

Der er udført længerevarende fuldskalaforsøg i Viborg og Hedensted, hvor tørstofindholdet i det afvandede slam blev målt sammen med flokstørrelse og en lang række andre slamegenskaber.

I fuldskalaforsøgsserien i Viborg er der observeret en signifikant sammenhæng mellem tørstofindhold i slam efter afvanding og flokstørrelse, moment i skruepressen, tørstofindhold i det indgående slam og kloridindhold i det indgående slam. Større flokke forudsiger generelt højere tørstofindhold i det afvandede slam i det undersøgte doseringsinterval.

Der er selvfølgelig en lang række ydre betingelser, der har betydning for slammets egenskaber, som ikke er blevet målt i dette projekt. Der vil over tid fx være variationer i forholdet mellem mængden af primærslam og aktivslam, der går til udrådning. Denne baggrundsvariation kommer til udtryk i form af ændringer i flokstørrelse ved konstant polymerdosering (se 1. periode i Figur 22) og som store forskelle i tørstofindholdet i det afvandede slam ved konstant polymerdosering (fra 27 % til 32 %, se Figur 20, venstre). Dette er som bekendt årsagen til, at man ikke kan måle en kalibreringskurve, og alene på den

baggrund regulere doseringen. Det giver derimod mening at overvåge flokstørrelsen kontinuerligt og se, hvordan størrelsen ændres, når der justeres på polymerdoseringen, frem for at forsøge at bruge flokstørrelse som en ren kalibreringsparameter.

Under fuldskalaforsøgene i Hedensted har der været markant mindre variationer i tørstofindholdet i det afvandede slam. Dette vurderes at være årsagen til, at der ikke er fundet signifikante effekter for disse forsøg. Vi vurderer, at dette skyldes to faktorer: 1) at polymerdoseringen har ligget i den øvre ende af et bredt interval, hvor der opnås maksimalt tørstofindhold som funktion af dosering, og 2) at polymeropblandingen og modning muligvis ikke er tilstrækkelig med den nuværende opbygning. Dette understøttes også af den observation, at rejktvandskvaliteten under fuldskalaforsøgene var bedst ved lave doseringer, uafhængigt af tørstofindholdet efter afvanding.

I de indledende forsøg i Hedensted var polymerdoseringen endnu højere end under fuldskalaperioden. Her observeredes en signifikant *negativ* effekt af øget dosering på både tørstofindhold og flokstørrelse. Det må således formodes, at optimum (som er relativt bredt) i tørstofindhold som funktion af faktisk polymerdosering blev overskredet ved forsøgene. Forsøgene demonstrerer desuden, at teknologien er i stand til at finde signifikante sammenhænge mellem flokstørrelse og relevante driftsparametre, såfremt disse er til stede.

Overordnet set må vi konkludere, at der ikke foreligger et tilstrækkeligt datagrundlag til at be- eller afkræfte teknologiens anvendelighed ved brug sammen med dekantere. Dette skyldes, at vi ikke har opnået data, der kan afgøre, om flokstørrelse korrelerer med tørstof i det område, hvor der opnås et minimum i de totale driftsomkostninger for slamafvandingen. Det er således relevant at undersøge dette yderligere, når det samtidig sikres, at det ikke er polymeropblandning og modning (eller mangel på samme), der skaber en flaskehals, i forhold til hvor god afvanding der kan opnås.

Overordnet indikerer resultaterne, at det kan give værdi at videreudvikle en integreret kamerasensor til at overvåge flokstørrelse kontinuerligt online, i første omgang med fokus på anlæg, der benytter skruepresse til afvanding.

Fysiske og kemiske analyser af slam

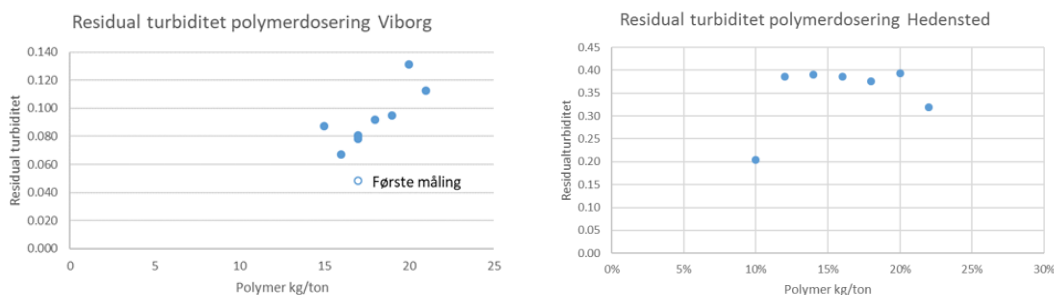
Forskellige fysisk-kemiske analysemetoder blev anvendt til at evaluere graden af flokkulering som et alternativ eller supplement til kameraanalyserne. Disse valgte metoder er opremset her:

- Capillary suction time (CST), som er et mål for afvandeligheden af slam
- Residual turbiditet som er et mål for, hvor mange partikler (kolloider) væsken indeholder efter en centrifugering dvs. partikler der ikke er flokkuleret tilstrækkeligt
- Tørstofindhold af kage ved sugefiltrering og efter skruepressen
- Tørstofindholdet i rejktvand.

Parametrene blev målt på flokkuleret udrådnet slam fra Hedensted og Viborg.

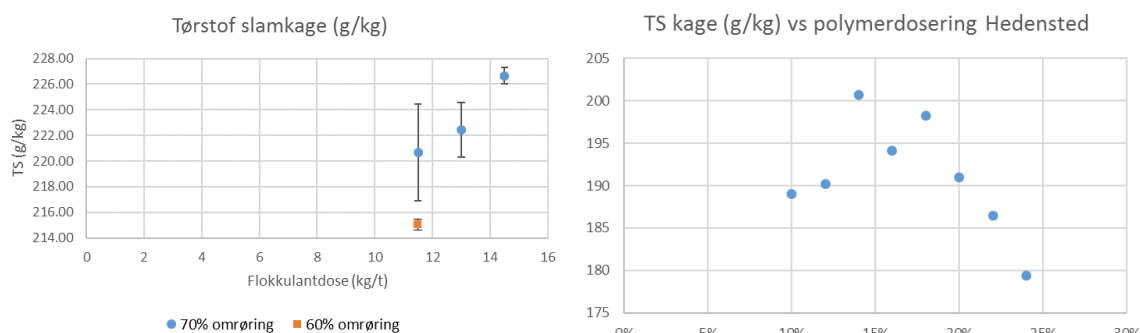
CST blev målt ved brug af et standard CST-meter fra Triton Electronics ved varierende dosis og indblanding af flokkulant. Metoden viste dog ingen signifikante ændringer som funktion af dosis og indblanding, da usikkerheden på målingen var for stor til, at der kunne måles nogen forskel mellem prøverne. Det skyldes, at prøverne alle var flokkulerede, og væsken med lethed kunne løbe omkring flokkende. Små ændringer på flokstruktur og størrelse kan altså ikke registreres ved brug af metoden.

Residual turbiditet blev målt ved at centrifugere slamprøver (10 mL) ved 2000 rpm i 2 min. Herefter blev supernatanten udtaget og turbiditeten målt ved 650 nm i et spektrofotometer. Turbiditeten vokser proportionalt med koncentrationen af partikler suspenderet i væskefasen. Ved flokkuleringstests på udrådnat slam fra Viborg, blev der observeret en optimal dosering af flokkulant ved 16 kg/ton, jf. Figur 33, venstre. Målingerne gav dog intet klart billede af, hvor godt slammet var flokkuleret, formentlig fordi der ikke er en entydig sammenhæng mellem koncentrationen af ikke-flokkulerede partikler og flokkenes størrelse, form og styrke.



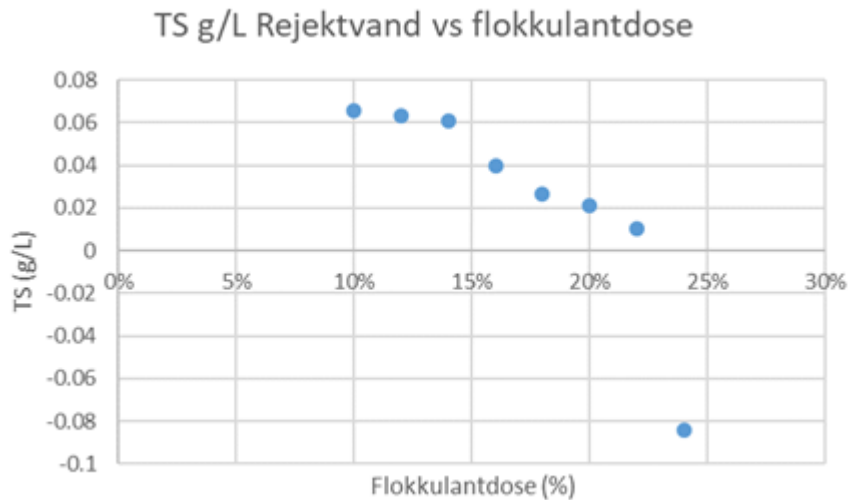
Figur 33. Residualturbiditet som funktion af polymerdosering for udrådnat slam fra Viborg (venstre) og slam fra Hedensted (højre).

Måling af tørstofindhold i filterkagen fra en simpel laboratorieskala-sugefiltreringsopstilling viste ikke nogen signifikant ændring af tørstofindhold som funktion af polymerdosering. Dette kan skyldes, at der bygges for lidt kage op under sugefiltreringen, og at slammet udsættes for et lavt tryk i forhold til afvandingen på renseanlæggene. Analyserne af tørstofindholdet i afvandet slam, udtaget fra skruepressen (Viborg) eller dekanteren (Hedensted), viste derimod en mere tydelig sammenhæng mellem tørstofindhold og polymerdosering. Ved Viborg steg tørstofindholdet konsekvent ved stigende dosering, hvorimod der ved flokkulering af slam fra Hedensted blev observeret en optimal dosering ved 18 % doseringsindstilling (ikke faktisk dosering), se Figur 34.



Figur 34. Tørstofindhold i slamkage fra skruepresse i Viborg (venstre) og centrifuge i Hedensted (højre) som funktion af polymerdosering (doseringsindstilling i Hedensted, ikke faktisk dosering).

Måling af tørstofindhold i rejeckt vandet viste lavere værdier ved højere flokkulantdosering, se Figur 35. Dette er i overensstemmelse med en højere grad af flokkulering, hvilket giver lavere tørstofindhold i rejeckt vandet. Metoden er dog forbundet med en vis usikkerhed, da der skal udtages forholdsvis meget prøve af rejeckt vand for at få en præcis måling. I de udførte forsøg i Hedensted blev der kun målt på 100 mL rejeckt vand ved hver prøvetagning.



Figur 35. Tørstofindhold i rejektvand fra centrifuge i Hedensted målt ved varierende flokkulantdoseringer.

Det overordnede billede fra de fysisk-kemiske metoder er derfor, at disse metoder ikke umiddelbart kan anvendes til at optimere flokkuleringsprocessen, indenfor det snævre doseringsinterval, der er relevant på renseanlæggene. Resultaterne tyder altså på, at nye metoder er nødvendige for at kontrollere og regulere flokkulanttilsætningen automatisk.

Analytisk metode til at bestemme det maksimale sluttørstof

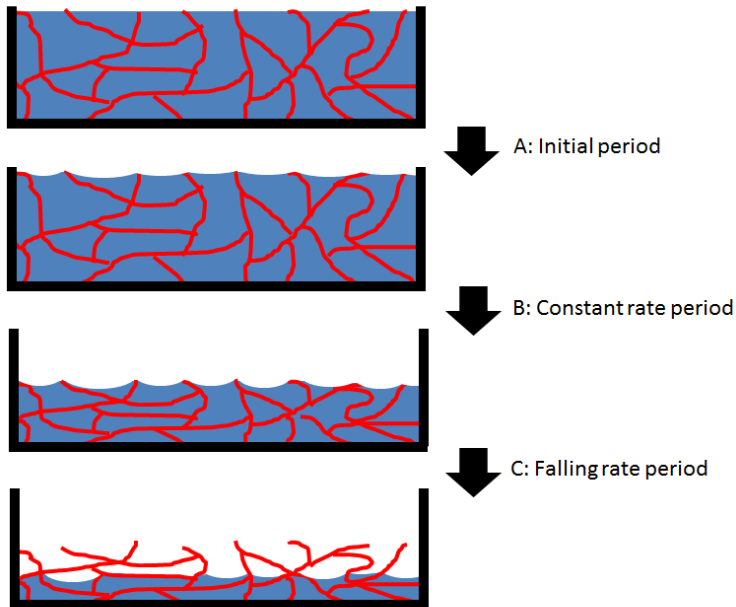
Formålet med kamerateknologien er automatisk at overvåge og styre polymerdosering af slam for derved at opretholde et højt sluttørstof af slammet efter mekanisk afvandning. For at kunne vurdere resultatet er det vigtigt at have en analysemetode til at bestemme kvaliteten af slammet og det maksimalt mulige sluttørstof. Slamkvaliteten skal kunne måles jævnlige, da slam kan ændre karakter over tid, hvorfor det er nødvendigt at ændre indstillingerne for styrings- og reguleringsprocessen.

Der findes forskellige metoder til at bestemme det maksimalt opnåelige sluttørstof. Den mest udviklede metode er en termogravimetrisk metode, som i dag anvendes kommercielt (www.kbkopp.de)³. I dette projektforsøg er metoden simplificeret, så metoden kan anvendes i et analyselaboratorium på et renseanlæg. Metoden er testet på udrådnet slam fra Viborg og aktivt slam fra Hedensted.

Teori for termogravimetrisk bestemmelse af sluttørstof

En termogravimetrisk analyse er en kontrolleret tørringsproces, hvor vægten af prøven monitoreres løbende under tørringsprocessen.

³ Kopp J, Dichtl N. Water Science and Technology. 2000. 42, 141-149. Kopp J, Dichtl N. Water Science and Technology. 2001. 43, 135-14. Kopp J, Dichtl N. Water Science and Technology. 44, 2001. 177-183



Figur 36. Tørring af slam

Teorien for tørringsprocesser er grundigt beskrevet i litteraturen⁴, men vil kort blive gennemgået her. Tørringen kan opdeles i tre faser, her angivet med de engelske udtryk: A) *initial period*, B) *constant rate period* og C) *falling rate period*, med illustrationer af hvert trin i Figur 36.

Efter en kort opstartsfasen (A), hvor der dannes menisker i porestrukturen, indtræffer den periode, der kaldes "*constant rate period*" (B). Tørringshastigheden er her konstant, og kagen skrumper pga. kapillarkræfterne, der trækker slamstrukturen sammen. På et tidspunkt er styrken af slamstrukturen stærk nok til at modstå kappilarkræfterne. Slamkagen skrumper ikke mere, slammets overflade bliver tør, og tørringshastigheden falder. Tørringsprocessen er nu i den fase, der kaldes "*falling rate period*" (C). Kopp har udviklet en metode, hvor tørstoffet af slamkagen bestemmes ved overgangen fra fase B til fase C. Det målte tørstof er lig det maksimalt mulige sluttørstof, hvis tørringen forløber tilstrækkelig langsomt, så vandtransporten indeni slammet ikke bliver begrænsende for tørringen. I praktisk sikres det ved at tørre en tynd slamkage (maks. 1 cm) ved lav temperatur.

Tørstoffet ved overgangen fra fase B til fase C antages at svare til det maksimalt opnåelige sluttørstof ved mekanisk afvandning. Hermed antages det, at styrken af kapillarkræfter er sammenlignelige med de kræfter, slammet udsættes for under mekanisk afvandning (såsom filtrering eller centrifugering). Kapillarkræfterne afhænger af slamvæskens overfladespænding (γ), diameteren af porerne i slamstrukturen (r) og kontaktvinklen mellem tørstof og væske (θ):

$$p_c = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta$$

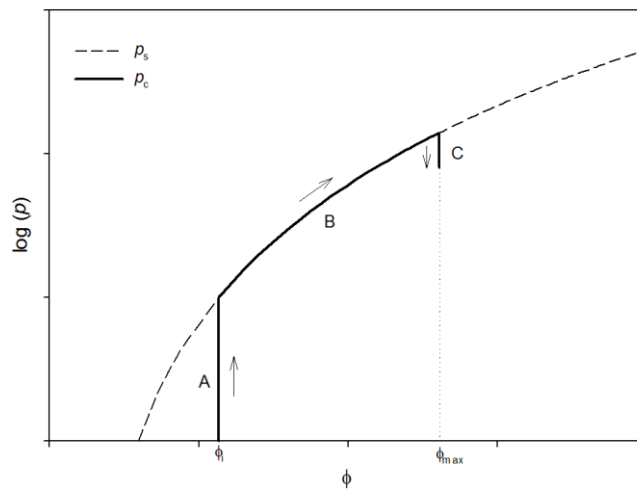
⁴ Scherer GW. J Am Ceram Soc. 1990;73(1):3–14.

For en tæt struktur, hvor den gennemsnitlige porediameter er 100 nm, vil et typisk kapillartryk være knap 15 bar. Det kan dog være vanskeligt at bestemme kapillartrykket præcist, da pore størrelsen er vanskelig at bestemme i praksis.

Styrken af kagestrukturen vokser med tørstoffet, dvs. det tryk, der skal til for at komprimere slammet (compressible yield stress), vokser som funktion af tørstoffet. Tørstoffet (ϕ) kan beskrives som funktion af trykket (P_s) ved brug af nedenstående empiriske ligning.

$$\phi = \phi_0 \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^\beta$$

I ligningen indgår to parametre, P_a og β , som begge er empiriske konstanter, der udtrykker hvor sammentrykkeligt slammet er. Data for dette er ikke bestemt for slam fra Viborg og Hedensted, da den type forsøg er meget omfattende, men Figur 37 viser et eksempel, hvor der anvendt data fra udrådnet slam.



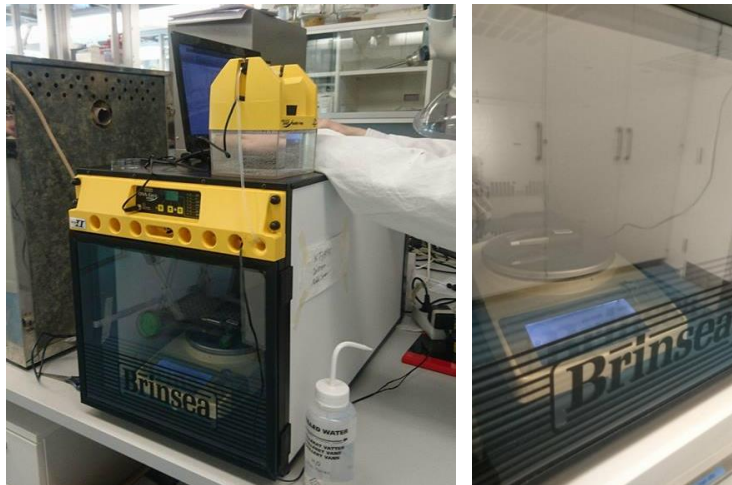
Figur 37. Compressible yield stress og kapillartryk som funktion af tørstof.

Under fase A stiger kapillartrykket. På et tidspunkt rammer kapillartrykket slamstrukturens styrke (compressible yield stress). Slamstrukturen presses nu sammen (B), indtil det kan modstå kapillartrykket (C). Her kan det maksimalt opnåelige sluttørstof (ϕ_{max}) ved mekanisk afvanding bestemmes.

Det antages, at polymertilsætning ikke påvirker det maksimalt opnåelige sluttørstof, hvilket er eftervist i litteraturen. Polymererne anvendes til at samle partiklerne, hvilket har betydning for hastigheden af afvandingen, men ikke for det maksimalt mulige sluttørstof. Dårligt flokkuleret slam vil derfor resultere i et sluttørstof langt under det maksimalt mulige.

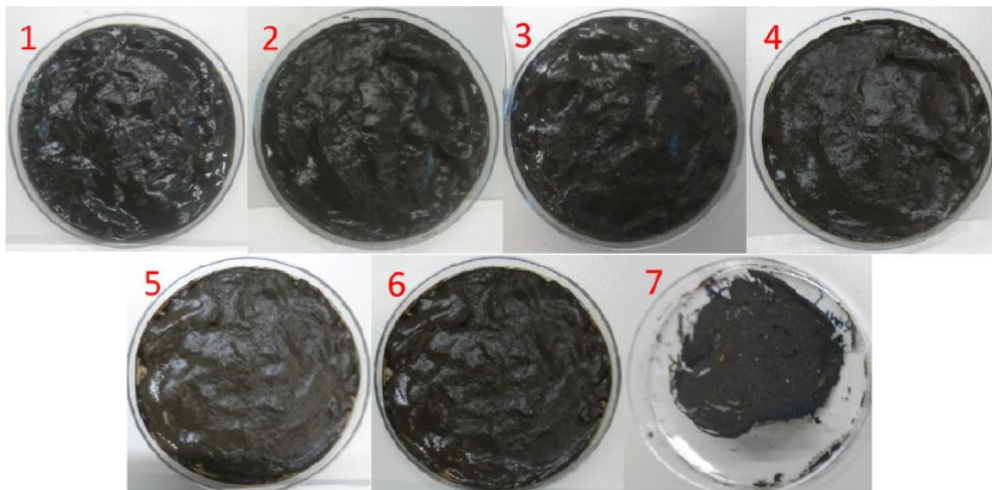
Metode og resultater

Udrådnet slam fra Viborg og aktivt slam fra Hedensted blev udtaget (hhv. den 20. november fra Viborg og 28. november fra Hedensted) og centrifugeret ved en påvirkning på 3000g, hvorefter supernatanten blev fjernet og bundfaldet fordelt jævnt i en petriskål. Slammet blev tørret ved konstant temperatur (35 °C), konstant luftfugtighed (40 %) og et jævnt luftflow henover petriskålen (0,5 – 1 m/s). Alle forsøg blev udført i en rugemaskine, hvori der blev installeret en vægt (Figur 38).



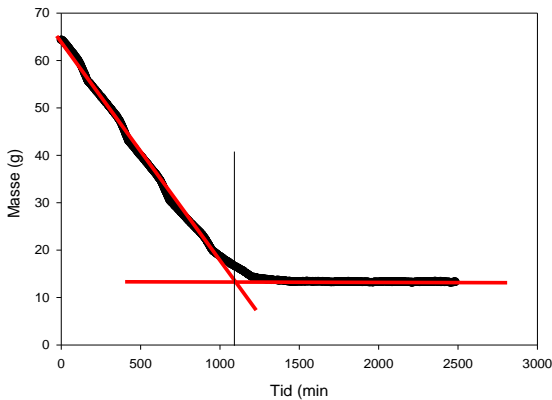
Figur 38. Rugemaskine til kontrol af temperatur og fugtighed under tørringsforsøg.

Temperatur og luftfugtighed blev logget under forsøgene for at sikre, at begge værdier blev holdt konstant. Det er planen at videreudvikle metoden, så slamhøjden monitoreres under tørringen og desuden installere et kamera for at sikre en bedre bestemmelse af tørstoffet mellem fase B og fase C. I Figur 39 er vist billeder, der er taget af slamprøven under tørringen. Det kan ses, at kagen krøller sammen på billede 7, hvilket sker under fase C.



Figur 39. Billeder af slamprøve fra Viborg under forskellige stadier af tørringen.

Vægten af petriskålen og slammet måles under forsøget (Figur 40), og det kan ses, at vægten falder under tørringen. Overgangen fra fase B til fase C er bestemt ved at indsætte to rette linjer og bestemme skæringen mellem de to linjer. Ud fra tørstoffet af slam, vægten af petriskålen og vægten ved overgangen fra fase B til fase C kan vandindholdet beregnes.



Figur 40. Tørring af slam fra Hedensted (venstre) og Viborg (højre).

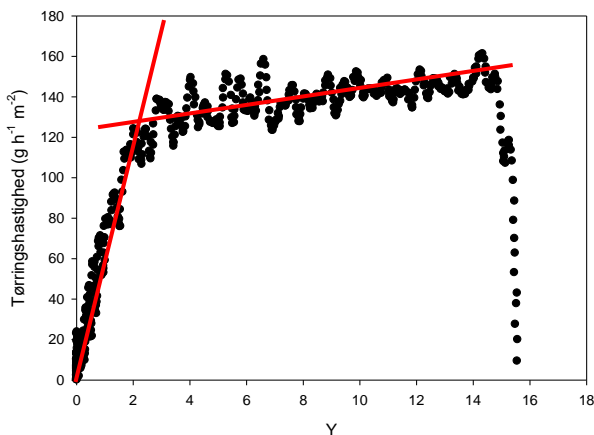
For Hedensted er vandindholdet $Y = 0,80$ kg vand pr. kg tørstof svarende til et maksimalt sluttørstof på **20 %**. Dette stemmer fint overens med, at der ikke er observeret tørstofindhold i det afvandede slam i Hedensted over dette niveau. Ligeledes antyder dette resultat, at afvandingen i Hedensted ligger meget tæt på det bedst opnåelige.

For Viborg er vandindholdet $Y = 1,89$ kg vand pr. kg tørstof svarende til et maksimalt sluttørstof på **35 %**. Dette er noget højere end de ca. 28 % i tørstof, der i gennemsnit er målt under forsøgene. Ydermere antyder resultatet, at det (i princippet) burde være muligt at optimere afvandingen yderligere.

Alternativet er at beregne tørringshastigheden (R), ud fra ændringen af vandindholdet (Y), massen af tørstof (m) og kontaktarealet mellem fugtigt gods og luft (A):

$$R = \frac{m dY}{A dt}$$

I praksis er tørringshastigheden beregnet ved at omregne alle målte vægte til vandindhold og ved hjælp af lineær regression at bestemme hældning. Der anvendes fem punkter, hvoraf tiden til det midterste punkt antages at være tidspunktet for den beregnede tørringshastighed. Data efter denne transformation er vist i Figur 41.



Figur 41. Tørringskurve for slam fra Hedensted.

En tørringshastighed på $120\text{-}140\text{ gh}^{-1}\text{m}^{-2}$ er sammenlignelig med litteraturen, men i den lave ende. Det stemmer overens med den lave temperatur, hvorunder slammet tørres. Ved at indlægge to rette linjer kan overgangen mellem fase B og fase C bestemmes. Med den præcision, som det er muligt at måle med, er det erfaringsmæssigt bedst at bruge de direkte data (masse *versus* tid).

Det er stadig usikkert, hvilken metode der er bedst til at identificere overgangen mellem fase B og fase C, hvorfor metoden ønskes udbygget, så slamhøjden kan måles under forsøget. Derudover kræver metoden et omfattende valideringsarbejde, hvor slam fra mindst 20 anlæg inkluderes for at sammenligne termogravimetrisk værdier med opnået sluttørstof.

Sammenhæng mellem sluttørstof og slamegenskaber

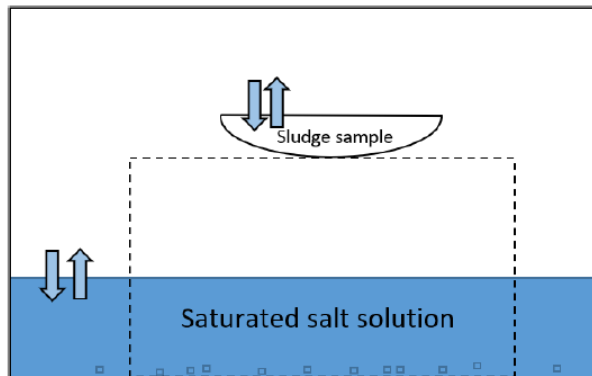
Det maksimalt mulige sluttørstof varierer en del for forskellige typer slam (20 – 35 %). Der eksisterer ikke nogen præcis viden om, hvordan slamegenskaber påvirker sluttørstoffet, men dog nogle forsøg på at kvantificere forskellige vandpuljer. Typisk deles vandet op i *frit vand*, der kan fjernes ved afvanding, og *bundet vand*. Bundet vand inkluderer kemisk og fysisk bundet vand og kapillærbundet vand⁵. En alternativ fortolkning er, at vandet fastholdes på grund af slampartiklernes ladning og det deraf opståede osmotiske tryk⁶.

Ved brug af måling af vands adsorption er det undersøgt, hvordan vandet fastholdes i slammet. Det har betydning, fordi denne viden på sigt kan anvendes til at ændre udrådningprocessen med henblik på at opnå en bedre afvanding, eller i forbindelse med indførelse af andre typer forbehandling, der kan øge mængden af frit vand.

Vandadsorptionen er bestemt ved, at en slamprøve centrifugeres (1000 g påvirkning), supernatanten fjernes, og slammet overføres til en skål. Skålen indsættes i en isoleret kasse henover en mættet saltopløsning, se Figur 42. Derved kan den relative fugtighed i kammeret kontrolleres. Der anvendes forskellige salte (LiBr, LiCl, CaCl₂, NaBr, KI, NaCl og (NH₄)₂SO₄), hvilket gør det muligt at måle vandadsorptionen ved forskellige relative fugtigheder.

⁵ Vesilind PA. Water Environ Res. 1994; 66 (1):4–11, Vaxelaire J, Cézac P. Water Res. 2004;38(9):2214–29.

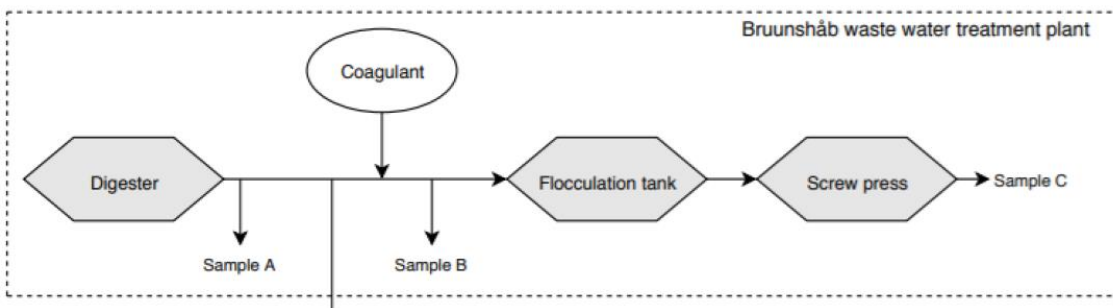
⁶ Keiding K, Wybrandt L, Nielsen PH. Remember the water - A comment on EPS colligative properties. Vol. 43, Water Science and Technology. 2001. 17-23 p.



Figur 42. Måling af vandadsorption til slam.

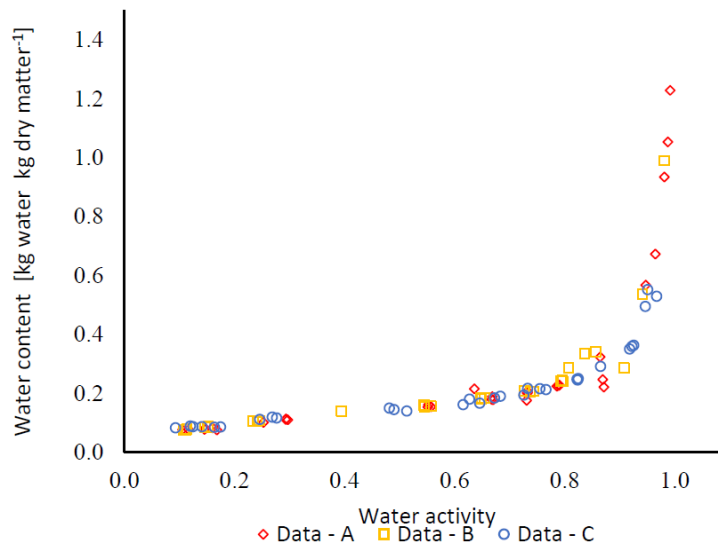
Prøverne udtages løbende og vejes. Efter at ligevægten har indstillet sig, bestemmes vandindholdet og sammenholdes med den relative fugtighed. Vandaktiviteten måles for prøverne (Aqualabinstrument) og sammenlignes med den relative fugtighed. De to værdier skal være ens, hvis ligevægten er indstillet. Temperaturen blev fastholdt på $23,1\text{ °C} \pm 0,6\text{ °C}$.

Der blev udtaget prøve på Viborg Centralrenseanlæg af udrådnet slam, slam efter tilsætning af koagulant (polyaluminiumklorid) og det afvandede slam, som illustreret i Figur 43.



Figur 43. Skematisk illustration af prøveudtagningssteder på Viborg Centralrenseanlæg.

Data fra målingerne af de tre typer slam er angivet i Figur 44. Det faktum, at data for de tre prøver overlapper langs kurveforløbet, indikerer, at vands binding til slammet ikke påvirkes af koagulanttilsætning og afvanding.



Figur 44. Målt vandindhold som funktion af vandaktivitet for slam fra Viborg Centralrenseanlæg.

To modeller er fittet til data. Den første model er en Langmuir adsorption isotherm, der er fittet til de eksperimentelle data op til et vandindhold på 0,2:

$$Y = \frac{Y_{mL}C_L a_w}{1 + C_L a_w}$$

hvor Y_{ml} er den maksimale mængde af fysisk adsorberet vand, C_L er ligevægtskonstanten for adsorptionen, og a_w er vandaktiviteten.

Bestemmelsen af ligevægtskonstanten bliver upræcis med de eksperimentelle værdier, der er til rådighed. Derimod er det muligt at bestemme, hvor meget vand der kan adsorberes. Denne værdi er bestemt til 8-13 g vand pr 100 g tørstof. Værdien er højere end for de fleste fødevarer, men på niveau med f.eks. gelatine (9 g vand pr. 100 g tørstof).

For hele forløbet anvendes Blahovec og Yanniotis adsorption isotherm⁷:

$$Y = \frac{a_w}{a_1 + b_1 a_w} + \frac{a_w}{a_2 - b_2 a_w} \quad (6)$$

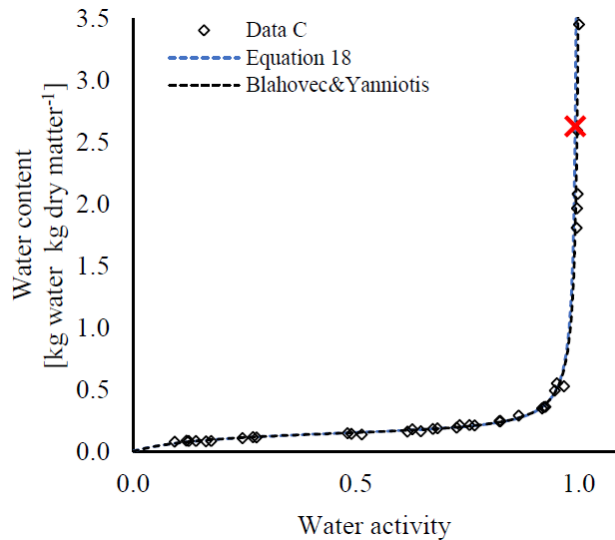
$$a_1 = \frac{C_L}{Y_{mL}}; b_1 = \frac{1}{Y_{mL}}; a_2 = \frac{\gamma}{M_w n_s}; b_2 = \frac{1}{M_w n_s} \quad (7)$$

hvor γ er aktivitetskoefficienten for væsken, n_s er stofmængden af opløste stoffer i vandet, og M_w er molarmassen for vand.

Første del af udtrykket (hvor værdierne a_1 og b_1 indgår) angiver vandadsorptionen til slam, og anden del af udtrykket (hvor værdierne a_2 og b_2 indgår) angiver reduktionen af vandets

⁷ Blahovec J, Yanniotis S. J Food Eng. 2009;91(1):72-7

flygtighed pga. det osmotiske tryk. Dette fit kan ses i Figur 45, hvor de eksperimentelle data (sort stiplede linje) er velbeskrevne.



Figur 45. Vandindhold som funktion af vandaktivitet for slam fra Viborg. Blahovec- og Yanniotis-ligningen er fittet til data.

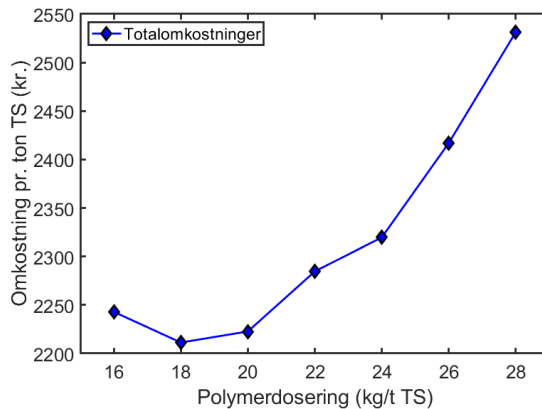
Det kan tyde på, at ideen om adsorberet vand og osmotisk "bundet" vand er en velegnet model til beskrivelse af vandbinding i slammet. Der er ikke noget i denne kurve, der indikerer et knæk ved det maksimalt opnåelige sluttørstof. Det skyldes formentlig, at det er slamstrukturen og ikke vandbindingen, der afgør det maksimalt mulige sluttørstof. Dette kan også forklare, hvorfor den termogravimetrisk metode giver anvendelige data. Det betyder formentligt også, at den bedste måde at forbedre sluttørstoffet på er ved at nedbryde noget af slamstrukturen. Det vil dog også gøre afvandingen vanskeligere, da det vil tage længere tid at afvande slammet.

Optimeringspotentialer

På baggrund af data fra de to renseanlæg er der foretaget vurderinger af, hvordan den nye teknologi kan benyttes til at foretage optimering på anlæggene.

For Viborg tages udgangspunkt i den indledende forsøgsrække, hvor polymerdoseringen blev øget fra det sætpunkt på 16 kg/t TS, som på forhånd var vurderet som værende optimalt. Data for det opnåede tørstofindhold *versus* dosering (Figur 13, venstre) er efterfølgende indsat i en økonomisk model, der beregner totalomkostningerne for slamhåndteringen (kun polymer- og bortskaffelsesomkostninger), og disse er vist i Figur 46. Beregningen baserer sig på indkøbsprisen for polymeren og afsætningsprisen, som i 2018 lå på ca. 400

kr./ton i Viborg. Disse to udgifter dækker ca. 80 % af alle omkostninger ved slamhåndteringen i Viborg.



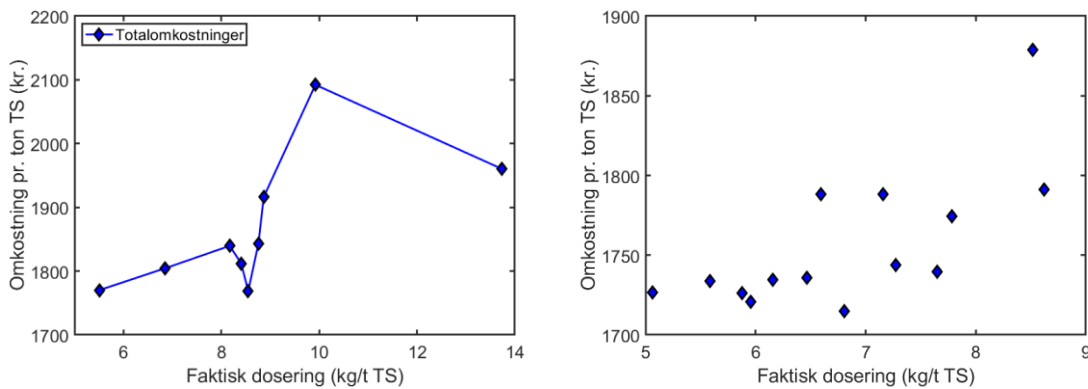
Figur 46. Omregning af resultaterne til totalomkostninger for polymerdosering og afsætning til slamdispensering, baseret på data fra Figur 13. Beregningen er baseret på en afsætningspris på ca. 400 kr./tons for slammet samt prisen for den benyttede polymer.

Denne figur viser, at på en repræsentativ dag ville den faktiske optimale polymerdosering, ved ca. 18 kg/t TS have resulteret i en reduktion i totalomkostningerne på 1,4 %. Besparelsen ville skyldes en stigning i tørstofindhold i slammet fra 24,7 % til 26,2 %, hvorved prisen for at bortskaffe et ton tørstof ville falde fra 1683 kr. til 1581 kr., samtidig med at de tilhørende polymeromkostninger ville stige fra 560 kr. til 630 kr.

I kraft af at fuldskalaforsøgene i Viborg demonstrerede signifikant sammenhæng mellem flokstørrelse og tørstofindhold efter afvandning vurderes det realistisk, at en færdigudviklet kamerateknologi (hvor flokstørrelser måles online) vil være i stand til at finde frem til dette optimum ved hjælp af en passende styringsstrategi. Design og efterprøvning af en sådan styringsstrategi ligger uden for projektets ramme, men vil være oplagt at arbejde videre med fremadrettet.

For Hedensted er resultaterne ikke helt så entydige som for Viborg i forhold til tørstof af det afvandede slam. I Figur 47 vises beregninger af totalomkostningerne for slamhåndtering under de indledende forsøg (venstre) og under fuldskalaforsøgene (højre). Prisen er beregnet som summen af polymer- og bortskaffelsesomkostninger.

De laveste omkostninger findes ved de laveste faktiske doseringer, og der er ikke observeret et klart minimum. Under de indledende forsøg *falder* tørstofindholdet, i takt med at den faktiske dosering steg fra ca. 9 kg/t TS (se Figur 17), hvilket er årsagen til den kraftige stigning i totalomkostninger ved de højere doseringer. Under fuldskalaforsøgene forblev tørstofindholdet konstant i doseringsområdet mellem 5 og 9 kg/t TS (se Figur 28). I det område, hvor doseringen i de to forsøg overlapper, er der observeret sammenlignelige totalomkostninger for slamhåndteringen.



Figur 47. Beregning af totalomkostninger for polymerdosering og afsætning til slamdisponering for resultaterne fra de indledende forsøg (venstre) og fuldskalaforsøgene (højre) i Hedensted. Beregningen er baseret på en afsætningspris på 303 kr./ton for slammet samt prisen for den benyttede polymer.

På baggrund af disse resultater konkluderes det, at det er muligt at spare ca. 20 % af polymerforbruget ved at låse det fast på en lavere faktisk dosering, som ville have givet samme afvandingsresultat, uden samtidigt tab af rejektivandskvalitet (se Figur 31, højre). For fuldskalaforsøgsperioden ville dette have udmøntet sig i en gennemsnitlig reduktion af totalomkostningerne på 2,4 %. Denne besparelse ville udelukkende skyldes en reduktion af polymerforbruget.

5.4 Konklusion

I projektet er der udviklet en billedsensor og analysemetode baseret på avanceret kamera-teknologi, der kan måle størrelsesfordelingen i en udtaget prøve af flokkulerede slam-flokke. Teknologien er testet i fuld skala på to renseanlæg, der afvander henholdsvis ud-rådnet (Viborg) og aktivt slam (Hedensted). På basis af forsøgene er det fundet, at der for almindelige driftsparametre i Viborg er en signifikant sammenhæng mellem flokstørrelse og tørstofindhold efter afvanding, hvor større flokke giver mere tørt slam. Der er ikke fundet en tilsvarende signifikant sammenhæng mellem flokstørrelse og tørstofindhold efter afvanding i Hedensted.

Undersøgelserne i projektet giver ikke anledning til, at der kan etableres en veldefineret sammenhæng (kalibreringskurve) mellem polymerdosering og flokstørrelse og dermed afvandingsresultat. Selvom polymerdoseringen holdes konstant, ses der markante dag til dag-ændringer i flokstørrelse og afvandingsresultat. Disse variationer kan tilskrives variationer i slammet, inden polymeren bliver tilsat.

For at blive klogere på andre parametre end polymerdoseringens indflydelse på afvandingsresultatet er der i projektet foretaget dataanalyse med statistiske metoder (machine learning) på store mængder onlinedata for forskellige tilstands-, drifts- og resultatparametre. Analysen viser, at højere tørstofkoncentration i det indgående slam medfører et bedre afvandingsresultat med samme polymerdosering. Høje koncentrationer af klorid leder til et dårligere afvandingsresultat med samme polymerdosering, og, vigtigst, de øvrige undersøgte parametre viser meget lille signifikans for afvandingsresultatet. Det konstateres, at det ikke har været muligt at finde andre tilstandsparametre for slammet, der kan måles online, og som sammen med polymerdosering og flokstørrelse kan bruges til at forudsige afvandingsresultatet med passende sikkerhed.

Konklusionen er derfor, at slammets varierende egenskaber betyder, at den optimale polymerdosering ændrer sig løbende, og at det ikke på baggrund af de målte tilstandsdata kan forudsiges, hvor meget og hvornår det sker. Der er endvidere etableret evidens for, at resultatparametre som flokstørrelse, men også moment i skruepressen og målt tørstof i afvandet slam, kan anvendes til at finde den varierende, optimale polymerdosering.

At det er resultatparametre og ikke tilstandsparametre, der skal anvendes til optimering af polymerdoseringen, betyder, at en ønsket styring af polymerdoseringen skal baseres på at inducere stepvise doseringsændringer og få løbende feedback om virkningen fra flokkuleringen/afvandingen. Det vurderes, at en onlineudgave af kamerateknologien vil gøre det muligt at optimere polymerdoseringen kontinuerligt på denne måde, så slammet hele tiden afvandes efter den mest optimale totaløkonomiske balance mellem tørstofindhold og polymerforbrug.

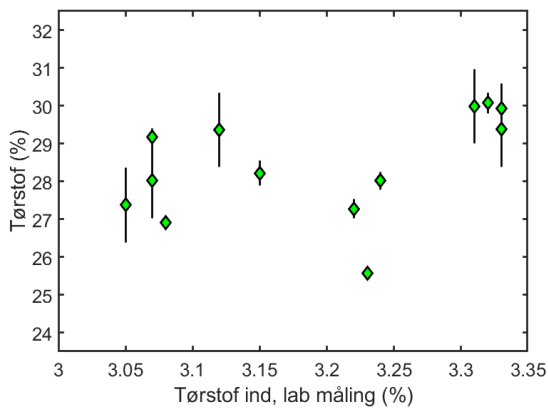
Forsøgene på de to renselanlæg har vist, at der stadig er potentiale for optimering ved normale driftsbetingelser. I Viborg demonstrerede de indledende forsøg, at der på en specifik dag kunne opnås mere end 2 procentpoint højere tørstofindhold i det afvandede slam ved højere doseringer. Dette ville have udmøntet sig i en forbedring af totaløkonomien for slamhåndteringen på 1,4 %. Det vurderes at være muligt at sammenkoble en fremtidig onlineversion af kamerateknologien med en driftsstrategi, der løbende justerer slamafvandingen hen til dette minimum i totalomkostninger.

I Hedensted kørte slamafvandingen uden signifikante udsving i tørstofindholdet i det afvandede slam igennem fuldskalaforsøgsperioden. Samtidig viste disse forsøg, at det bør være muligt at sænke polymerforbruget med ca. 20 % og stadig opnå samme tørstofindhold i slammet og derved opnå en forbedring af totaløkonomien for slamhåndteringen på 2,4 %. Målinger af rejektivandskvaliteten indikerer, at denne ikke vil falde som resultat af en lavere dosering. Det undersøgte doseringsinterval i Hedensted har ligget for højt til at identificere et minimum i totalomkostningerne for slamhåndtering, og det har derfor ikke været muligt at nå frem til en endelig konklusion omkring teknologiens potentiale i forhold til dekantere.

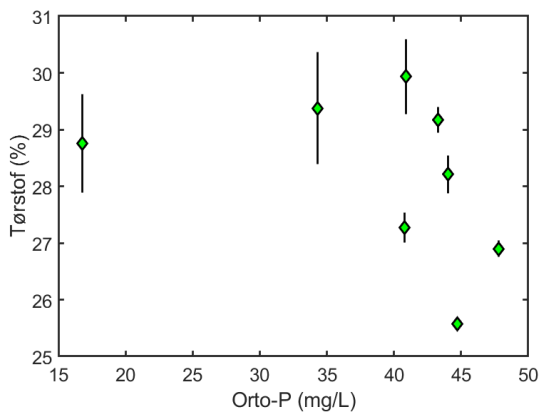
I projektet er der udviklet en ny laboratorieanalyse til at karakterisere slammets afvandingspotentiale. Metoden kan benyttes til at vurdere de mere overordnede muligheder for at optimere slamafvandingen på et renselanlæg og kan ses som et udtryk for det teoretisk bedst mulige afvandingresultat. Metodens resultater indikerer, at tørstofprocenten i Hedensted er meget tæt på det maksimalt opnåelige i det afvandede slam (20 %), mens metoden indikerer, at der i Viborg stadig kan være 4-7 procentpoint at hente på tørstofindholdet, selvom Viborg Renselanlæg har arbejdet intensivt med at optimere afvandingen. Dette resultat for slammet fra Viborg er ret overraskende og bør give anledning til, at metodens resultater valideres på tværs af et større antal renselanlæg.

6 Bilag

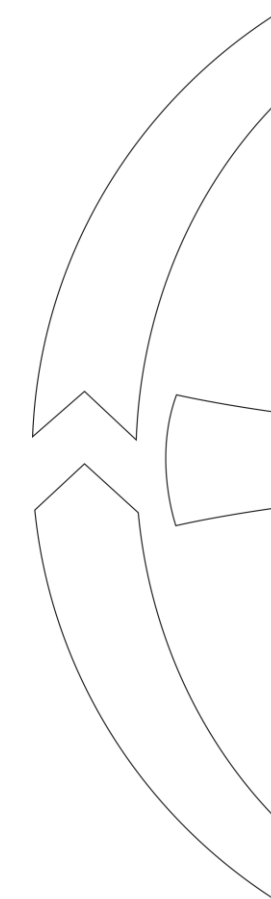
Bilag I – Fuldskalaforsøg på Viborg Centralrenseanlæg

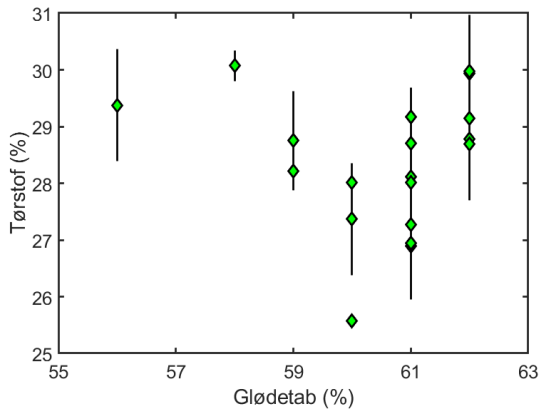


Bilag Ia. Tørstofindhold i det afvandede slam *versus* tørstofindhold i det indgående slam, målt i laboratorie på udtagne prøver.

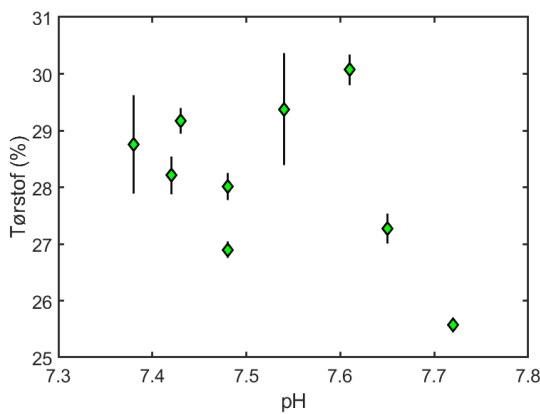


Bilag Ib. Tørstofindhold efter afvanding *versus* orthophosphopat-indhold i det indgående slam.



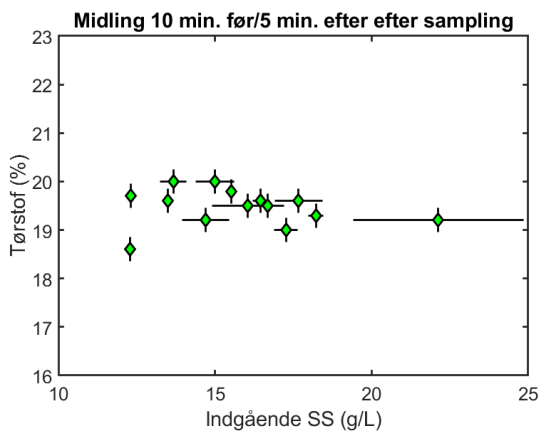


Bilag Ic. Tørstofindhold efter afvanding *versus* glødetab i det afvandede slam.

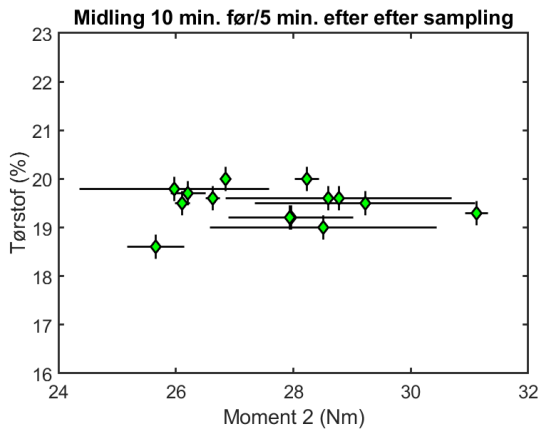


Bilag Id. Tørstofindhold efter afvanding *versus* pH i det indgående slam.

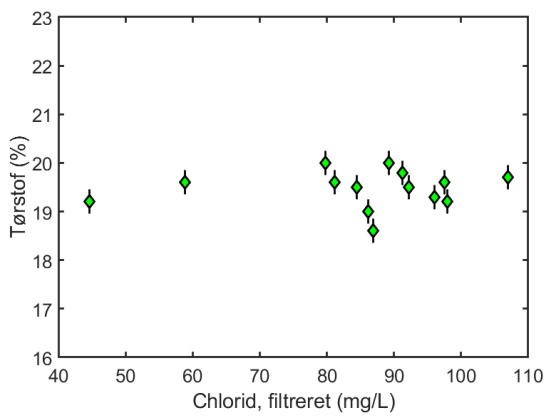
Bilag II – Fuldskalaforsøg på Hedensted Renseanlæg



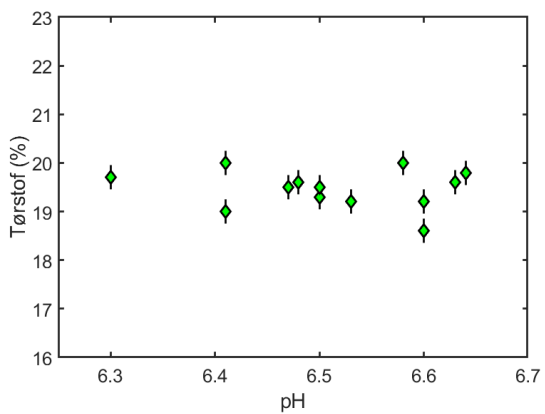
Bilag IIa. Tørstofindhold efter afvanding *versus* SS i det indgående slam.



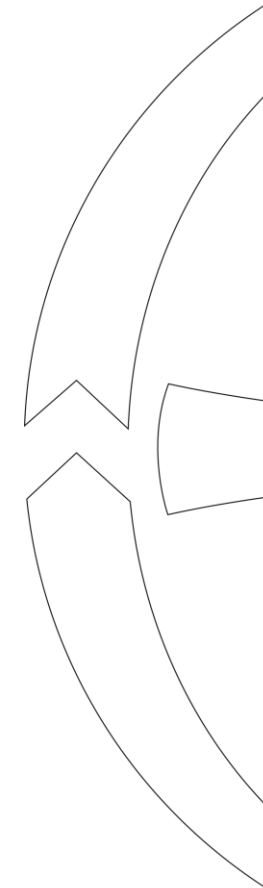
Bilag I Ib. Tørstofindhold efter afvanding *versus* moment i dekanteren.

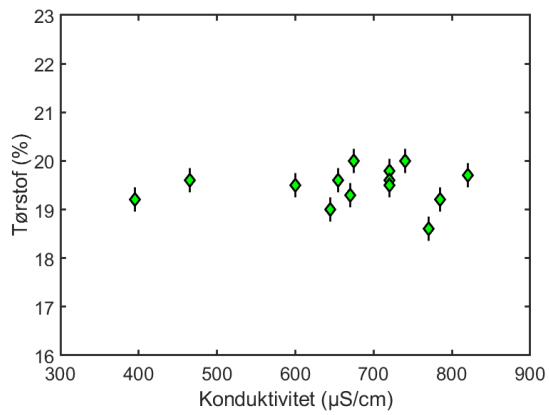


Bilag I Ic. Tørstofindhold efter afvanding *versus* klorid i det indgående slam efter filtrering.



Bilag I Id. Tørstofindhold efter afvanding *versus* pH i det indgående slam.





Bilag IIe. Tørstofindhold efter afvanding *versus* konduktivitet i det indgående slam.

