

ELEKTROKOAGULERING TIL SEPARATION AF SPILDEVAND (ELEKTROSEP)



ELEKTROKOAGULERING TIL SEPARATION AF SPILDEVAND (ELEKTROSEP)

DATO: 20. november 2020

Projekt-ID: 37.2019

Udgiver: Billund Vand & Energi

Udarbejdet af: Lasse Holch Nielsen

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

Samarbejdspartnere:

- DIN Forsyning A/S
- BlueKolding A/S
- Teknologisk Institut
- Aalborg Universitet
- AL-2 Teknik A/S.

Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning): Spildevand

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning	3
2	English summary	4
3	Introduktion	5
4	Projektets betydning for vandbranchen	7
4.1	Marked og/eller anvendelsesmuligheder	7
4.2	Næste skridt	7
4.3	Formidlingsplan	7
5	Projektet	10
5.1	Formål	10
5.2	Output	10
5.3	Projektresultater	10
5.4	Konklusion	17
6	Litteraturliste	19
7	Appendiks	20
	Appendix 1: Litteraturreview	21
	Appendiks 2: Forsøg udført af Aalborg Universitet	22
	EC til at øge COD fjernelse ved primær fældning	22
	Fosforfældning i aktivt slam	24
	Forbedring af flokkulering og afvanding på udrådnetslam	28
7.1	Konklusioner	29

1 Sammenfatning

Projektet ELEKTROSEP har i arbejdsplanke 1 til 3 (AP1-AP3) undersøgt, om elektrokoagulation er en brugbar teknologi i dansk spildevandsbehandling. Elektrokoagulation udmærker sig ved at højne arbejdsmiljøet, ved en lav eller ingen påvirkning af substratets pH og ingen tilførsel af modion, der hhv. kan være ætsende og inhiberende på efterfølgende biologiske processer.

I AP2 har Teknologisk Institut udført et litteraturstudie, der har undersøgt elektrokoagulations virkemåde, potentiale og udfordringer. Ifølge litteraturstudiet udmærker elektrokoagulation sig ved

- en stabil pH,
- mindre slamdannelse,
- ingen modion,
- lavere driftsomkostning,
- mere effektiv koagulation

Laboratorieforsøg udført af Aalborg Universitet i AP3 har eftervist, at pH er stabil ved en effektiv fjernelse af opløst fosfat, mens der sker en forsurening ved tilsvarende kemisk koagulation. En økonomisk vurdering har vist, at OPEX for elektrokoagulation er 3,65 kr per kg tilsat jern, mens kemisk koagulation med jernsulfat har en OPEX på 4,25 kr per kg tilsat jern. Dertil kommer at lavere udgifter ved transport og opbevaring. Før biologiske processer, hvor modionen er problematisk som anamoxprocessor ved Grindsted anlægget bruges dyre flogulanter. Her vil den potentielle reduktion af OPEX for elektrokoagulation være højere. I projektet kunne der dog ikke vises en effekt af elektrokoagulation i udrådnit slam. Det vides ikke om dette skyldtes en høj baggrundskoncentration af jern i slammet.

Laboratorieforsøgene kunne ikke vise en højere effektivitet ved elektrokoagulation frem for kemisk koagulation. Der sås i stedet en sammenlignelig effektivitet imellem kemisk og elektrokoagulation både ved reduktion af opløst COD og fosfat. Effektiviteten for elektrokoagulation kan sandsynligvis forbedres, da laboratorieforsøget var udført med et monopolar set up frem for mere effektive bipolar konfigurationer, som blev identificeret i litteraturstudiet.

Under litteraturstudiet rejstes en bekymring om effektiviteten af elektrokoagulation med jern kunne begrænses af iltmætningen i spildevandsstrømmen. Derfor udførtes yderligere måleserier med aluminiumselektroder samt måleserier med og uden beluftning. Forsøgene viste, at elektrokoagulation med aluminium og jern har sammenlignelig effekt, og at beluftning ikke er nødvendig ved doseringer af jern under 50 mg/L.

ELEKTROSEP-projektet har vist, at elektrokoagulation er en anvendelig teknologi i dansk spildevandsbehandling. Ved implementering til at øge mængden af slam ved primær fældning kan en elektrokoagulationsreaktor evt. placeres umiddelbart før primær fældningstank. Ved elektrokoagulation til fosforfældning vil det være fordelagtigt at udnytte den ilt, der er til stede i det beluftede slam, hvorfor en elektrokoagulationsreaktor vil kunne implementeres som en sidestrømsreaktor koblet på beluftningstanken eller mellem beluftningstank og bundfældningstank.

Doseringen af koagulant er afhængig af elektrodeareal og opblanding. For at sikre elektrokoagulation som en fremtidig teknologi, skal der udføres pilotskalaforøg med fokus på design, elektrodekonfiguration og polvending.

2 English summary

The ELEKTROSEP project has in work package 1 to 3 investigated, whether electrocoagulation is a viable technology in Danish wastewater treatment. Electrocoagulation excels by decreasing risk of work hazards, having no or low effect on the pH, and not adding unwanted ions chlorine, which is corrosive and can inhibit downstream biologic processes.

In work package 2 Teknologisk Institut has performed a literature review, investigating the theory behind and potential challenges of electrocoagulation. According to the study electrocoagulation exceeds by

- Stable pH,
- smaller sludge production,
- no unwanted ions,
- lower OPEX,
- more effective coagulation.

Laboratory experiments conducted by Aalborg University in work package 3 have shown that the pH remains stable during an effective reduction of dissolved phosphate. An equivalent removal with chemical coagulation showed an acidification. A financial survey showed electrocoagulation has an OPEX of 3,65 DKK per added kg of iron, whereas chemical coagulation with iron sulphate has an OPEX of 4,25 DKK per added kg of iron. Furthermore, expenditures for transport and storage are smaller with electrocoagulation. The formation of counterions can be problematic when coagulation is used upstream of biological processes, such as for anammox processes in the Grindsted treatment plant. Expensive flocculants are used for these processes, and the potential reduction of OPEX is significantly larger here. This project could not verify an effect of electrocoagulation in digested sludge. However, it was not possible to determine if this was a general effect of electrocoagulation, or due to the high background concentration of Iron in the sludge.

The laboratory experiments could not verify a higher efficiency of electrocoagulation compared to chemical coagulation as suggested in the literature review. Instead the efficiency of reduction of diluted COD and phosphate were comparable for chemical- and electrocoagulation. The efficiency of electrocoagulation could probably be improved, as the laboratory experiments for simplicity were conducted with a simple monopolar system rather than more effective bipolar configurations identified in the literature study.

During the literature review it was pointed out that the efficiency of electrocoagulation with iron could be limited by the dissolved oxygen content. Hence, additional measurement with aluminum electrodes and measurements with iron with and without aeration were conducted. The measurements showed that the effect of electrocoagulation with aluminum and iron is comparable, and aeration is not necessary for doses of iron below 50 mg/L.

The ELEKTROSEP project has proved that electrocoagulation is an applicable technology for Danish wastewater treatment. An electrocoagulation reactor can be implemented directly upstream of the primary settling reactor for an increased sludge recovery. For phosphate removal it is beneficial to place the electrocoagulation reactor in a stream with high dissolved oxygen content, e.g. as a side stream from the aeration reactor, or between the aeration reactor and settling tank.

The dosage of coagulant is dependent of the electrode area and mixing of the fluid. To ready electrocoagulation as a future technology, pilot scale experiments with focus on design, electrode configuration, and polarity alternation must be conducted.

3 Introduktion

Separation af tørstof og fosfat er essentielt i dansk spildevandsbehandling. For at opnå en effektiv separation tilsættes ofte kemisk baserede koagulanter (typisk jern eller aluminium med klorid/sulfat som modion) og/eller omkostningstunge polymerer.

Anvendelsen af traditionelle koagulanter medfører desværre ofte en høj slamdannelse og indebærer en betydelig arbejdsmiljømæssig risiko (ætsende). Desuden har flere af de traditionelle koagulanter sideeffekter relateret til modionen, herunder korrosion, forurening og inhibering af biogas-/anammoxprocesser. Der er således behov for et både billigt, drifts- og arbejdsmiljømæssigt sikkert alternativ.

Elektrokoagulering er en miljøvenlig teknologi, der endnu ikke har vundet indpas i spildevandsbranchen. Ved elektrokoagulering frigives jern/aluminium fra elektroder som alternativ til tilsætning af kemikalier, hvorved modioner undgås. Elektrokoagulering vurderes at have følgende fordele sammenlignet med traditionel koagulering:

- Mere effektiv koagulering
- Lav/ingen påvirkning af pH
- Ingen modioner (klorid/sulfat)
- Lavere driftsomkostninger
- Mindre slamproduktion
- Bedre slamafvandingssegenskaber.

Der var forventet følgende udfordringer ved elektrokoagulering:

- Elektrodefouling og hydroxidaflejringer, der kan reducere elektrodernes effekt
- Opløsning og udskiftning af elektroder
- Vanskelig styring af jern dosering, da øget spænding kan medføre konkurrerende reaktioner i stedet for øget jernfrigivelse.

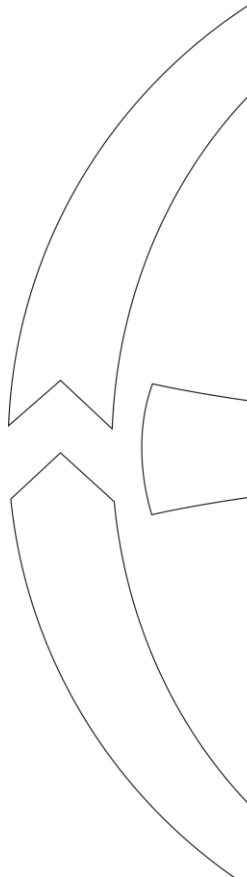
For at gøre elektrokoagulering i spildevandsmatricer tilgængelig for danske renseanlæg vil projektet ELEKTROSEP håndtere de nævnte udfordringer ved udviklingen af et effektivt design og ved processtyring.

ELEKTROSEPs formål er at give danske renseanlæg adgang til driftssikker og omkostnings-effektiv elektrokoagulering. ELEKTROSEP vil derfor håndtere de nævnte ulemper med udviklingen af et effektivt teknologidesign og en optimeret processtyring.

ELEKTROSEP bestod oprindeligt af seks arbejdsopgaver (AP1-AP6):

- AP1: Projektledelse
- AP2: Litteraturgennemgang
- AP3: Laboratorieforsøg
- AP4: Design af pilotskalareaktor
- AP5: Optimering af pilotskalareaktor
- AP6: Demonstration.

Under ansøgningsprocessen blev projektet imidlertid kraftigt beskåret, således at der alene blev bevilliget midler til de første tre arbejdsopgaver (kort beskrevet herunder).



AP1: Projektledelse

AP2: Litteraturgennemgang

I AP2 gennemgås relevant litteratur med fokus på elektrokoaguleringsreaktorer for at sikre, at projektet er opdateret med den nyeste viden mht. diverse styrings- og designrelaterede parametre, herunder jernfrigivelse, gasdannelse, overpotentialer, opholdstid, elektrodeareal, polvendingsfrekvens og reaktordesign.

AP3: Laboratorieforsøg

I AP3 testes opstillede hypoteser omkring bl.a. styring og koagulering i udvalgte vandmatricer fra forsyningerne. Testene forventes bl.a. at vise, at polvendinger vil modvirke hydroxidaflejninger [3], og at jern doseringen vil kunne styres via spænding og elektrodeareal.

For at dokumentere elektrokoagulerings anvendelighed og for at øge robustheden af de identificerede styrings- og designparametre vil forsøgene i laboratoriet blive baseret på prøver fra de tre forsyninger, som vil bidrage med tre vandtyper: Udrådnet slam, indløbsvand til primær tank og indløbsvand til anaerob/aerob reaktor. Oprindeligt skulle der være indsamlet prøver fra de tre typer på hvert anlæg. Det var dog ikke muligt pga. COVID-19-pandemien.

Denne slutrapport beskriver resultater mv. fra AP2 og AP3.



4 Projektets betydning for vandbranchen

ELEKTROSEP vil kunne bane vejen for elektrokoagulering i den danske spildevandsbranche og dermed bidrage til et sikrere arbejdsmiljø og et grønnere samfund til glæde både for rensningsanlæg og for borgere.

Projektet ELEKTROSEP har på nuværende tidspunkt bidraget til at anskueliggøre elektrokoagulerings potentialer og udfordringer i den danske spildevandsbranche.

Potentialet er anskueliggjort ved gennemgang af den hidtidige forskning på området og ved at gennemføre laboratorieforsøg på spildevandprøver fra de tre forsyninger, der deltager i projektet. Herigennem har ELEKTROSEP skabt et overblik over den relevante viden på området, og det er blevet testet, dels hvilke spildevandsstrømme (hos forsyningerne) der er egnede til elektrokoagulering, dels hvordan elektrokoagulering evt. kan tilpasses for at optimere outputtet.

4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Det beskårede ELEKTROSEP-projekt omfatter alene de indledende undersøgelser, da selve produktudviklingsdelen (AP4-AP6) ikke blev bevilget. Der er derfor ikke noget salgbart produkt ved projektafslutning, da et sådant produkt skulle være udviklet i arbejdsplanke 4-6.

4.2 Næste skridt

Som nævnt blev projektet kraftigt beskåret i ansøgningsprocessen, men på baggrund af resultaterne fra de gennemførte arbejdsplanke AP1-AP3 vurderes det, at der er grundlag for at gennemføre et egentligt udviklingsarbejde i pilotskala i et opfølgende projekt. Det overvejes p.t., i hvilken form nærværende projekt skal fortsætte.

4.3 Formidlingsplan

Projektets formidlingsbare resultater udgøres primært af resultaterne fra laboratorieforsøgene på tre typer af spildevand fra de tre forsyninger. Aalborg Universitet planlægger i den forbindelse at præsentere resultaterne på IWA World Water Congress i København, maj 2021, hvor resultaterne er accepteret til en posterpræsentation. Der var indsendt et abstract til Dansk Vand 2020, som imidlertid blev aflyst. Resultaterne vil blive forsøgt formidlet gennem et videnskabeligt tidsskrift, formentlig med fokus på effektiviteten af elektrokoagulering sammenlignet med kemisk koagulering og på mulige optimeringsmuligheder ved anvendelse af elektrokoagulering til behandling af spildevand.

Der er publiceret oplysende artikler om projektet i DANVAs tidsskrift og på Teknologisk Instituts hjemmeside. Desuden er der udgivet en video, der forklarer teknologien, og der vil blive udgivet artikler i VAND og i Spildevandsteknisk Forenings medlemsblad.

Aktivitet	Dato
Interview i P4 radio Udgangspunkt i BlueKolding og deres medvirken i projektet	November 2019
Billund Vand & Energi hjemmeside	November 2019 https://billundvand.dk/nyheder/nyhedsarkiv/stroemfoerende-jernplader-skal-goere-reanseanlaeg-groenere/
BlueKoldings hjemmeside	November 2019
Teknologisk Instituts hjemmeside	December 2019 https://www.teknologisk.dk/projekter/projekt-elektrokoagulering-af-spildevand-skal-saenke-brug-af-kemikalier-og-forbedre-arbejdsmiljoet/41498
DIN Forsynings hjemmeside	Januar 2020 https://dinforsyning.dk/da-dk/nyheder?itemId=News_Item:2658
LinkedIn-opslag - Teknologisk Institut	Januar 2020 https://www.linkedin.com/posts/teknologisk-institut_spildevand-skal-rens-med-f%C3%A6rre-kemikalier-activity-6625620401076731904-3tG_
Artikel i Energy Supply	26. april 2020 https://www.energy-supply.dk/article/view/707860/forsyningsselskaber-saetter-strom-til-spildevandet
IWA - abstract indsendt og accepteret	November 2019
Dansk vand – abstract indsendt	25.-26. november 2020
Vandforum DANVA - aflyst	April 2020
Pressemeddelelse bragt i 12 artikler	December 2019 <ul style="list-style-type: none"> – Licitationen - Byggeriets Dagblad, 30. april 2020 – Idag.dk, 27. april 2020 – Magasinet Forsyning 27. april 2020 – Energy-Supply.dk, 26. april 2020 – Tekniskfokus.dk, 12. februar 2020 – Teknovation.dk, 7. februar 2020 – Automatik.nu, 7. februar 2020 – MesterTidende.dk, 4. februar 2020

	<ul style="list-style-type: none">- Gts-net.dk, 3. februar 2020- Energy-Supply.dk, 31. januar 2020- Idag.dk, 31. januar 2020- Altomteknik.dk, 31. januar 2020
WaterTech	30. januar 2020
DANVA-webinar	Juni 2020 (inkl. film) https://www.danva.dk/viden/vudp/hvor-er-vandsektoren-paa-vej-hen/
Artikel i Dansk Vand	Indsendt 21. august 2020
Artikel i Vand	Under udarbejdelse
Artikel i Spildevandsteknisk Forenings medlemsblad	Indsendt november 2020

5 Projektet

5.1 Formål

ELEKTROSEPs reviderede formål har været at anskueliggøre potentialet og udfordringerne ved anvendelse af elektrokoagulering i den danske spildevandsbranche, således at det efter projektet er muligt at vurdere, om elektrokoagulering er en egnet teknologi til brug i den danske spildevandsbranche.

5.2 Output

Projektets primære output er testen af, hvor godt elektrokoagulering virker i de forskellige spildevandsstrømme hos forsyningerne og effekten af de forskellige tiltag til at optimere på elektrokoaguleringsprocessen, når den anvendes i disse strømme.

5.3 Projektresultater

I AP2 er der udført et litteraturstudie. Studiet belyste den grundlæggende teori bag elektrokoagulering og potentialet for teknologien. Baseret på litteraturstudiet er der i AP3 udført laboratorieundersøgelser. Resultaterne af laboratorieundersøgelserne er beskrevet i dette afsnit.

Der er udført analyser på tre typer spildevand:

1. Indløbsvand til primær fældning
2. Indløbsvand til anaerob tank
3. Udrådnat slam.

Ved typerne 1 og 2 sås en reduktion af COD samt udfældning af fosfat. For type 3 kunne der ikke påvises en effekt af hverken elektrokoagulering eller kemisk jern-koagulering. Det bemærkes her, at slammet oprindeligt havde et jernindhold, der var væsentligt højere end den doserede mængde.

5.3.1 Tilførsel af koagulant

Der blev udført laboratorieforsøg med både jern- og aluminiumselektroder. Den teoretiske frigivelse af masse, m , af jern-/aluminium er bestemt af Faradays lov for elektrolyse [1]

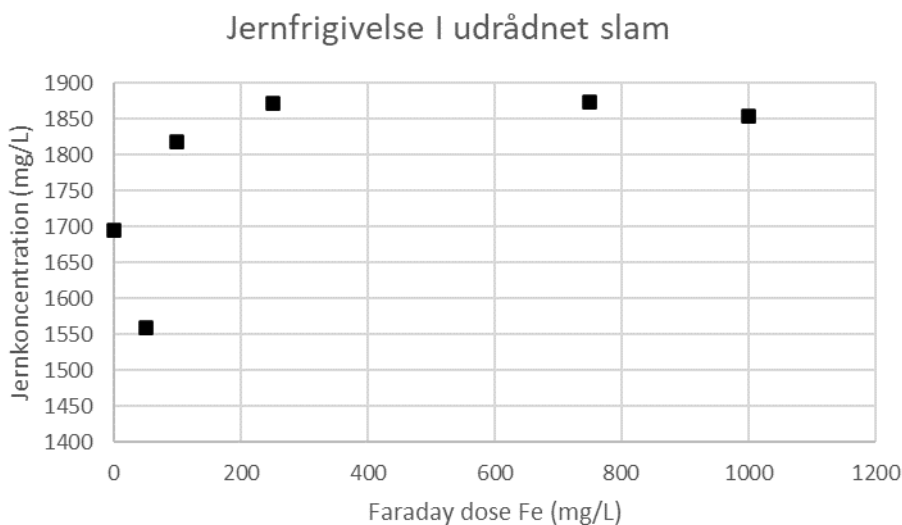
$$m = \frac{I t M}{Z F},$$

hvor I er strømstyrken, t tiden, M molarmassen af elektroden, Z antallet af elektroner i reaktionen (2 for Fe^{2+}) og F er Faradays konstant. I laboratorieforsøgene blev strømstyrken fastholdt på 200 mA, og mængden af koagulant blev reguleret ved at forkorte/forlænge perioden, hvor strømmen var tændt. For elektrokoaguleringscellen brugt i forsøget betød det, at der på 86 sekunder teoretisk blev doseret 5 mg. Analyser viste at 74 - 80 % af den teoretiske masse blev frigivet.

Der blev lavet forsøg med frigivelse af jern fra elektroder i både en batch og kontinuær flowreaktor. Ved behandling af slam blev der dog observeret udfordringer ved den kontinuerte reaktor, som blev udfordret af at slamflokke udfældede inde i reaktoren, hvilket del-

vist stoppede den til. Der blev derfor skiftet til en batch reaktor, som bestod af et bægerglas med nedsænkede elektroder. Der skal derfor arbejdes med optimering af reaktordesign med henblik på at optimere strømningshastighed især for viskøse suspensioner som slam, hvis elektrokoagulering skal implementeres i større skala.

Ved udrådnat slam sås en stagnering af prøvens jernkoncentration efter 30 minutters dosering. Se Figur 1. Der kan ikke gives en sikker forklaring på, hvorfor jernkoncentrationen ikke stiger ved fortsat elektrokoagulering, og hvorfor den høje jernkoncentration ikke hæmmer reduktionspotentialt signifikant, jf. Nernst-ligningen. Der peges dog på, at den høje jernkoncentration i prøven giver stor usikkerhed på målingen.



Figur 1. Jernfrigivelse fra Fe-elektrode i udrådnat slam. Dosering angivet som teoretisk dosis. 100 mg/L svarer til ~15 min. Figur er leveret af Aalborg Universitet.

5.3.2 Reduktion af COD

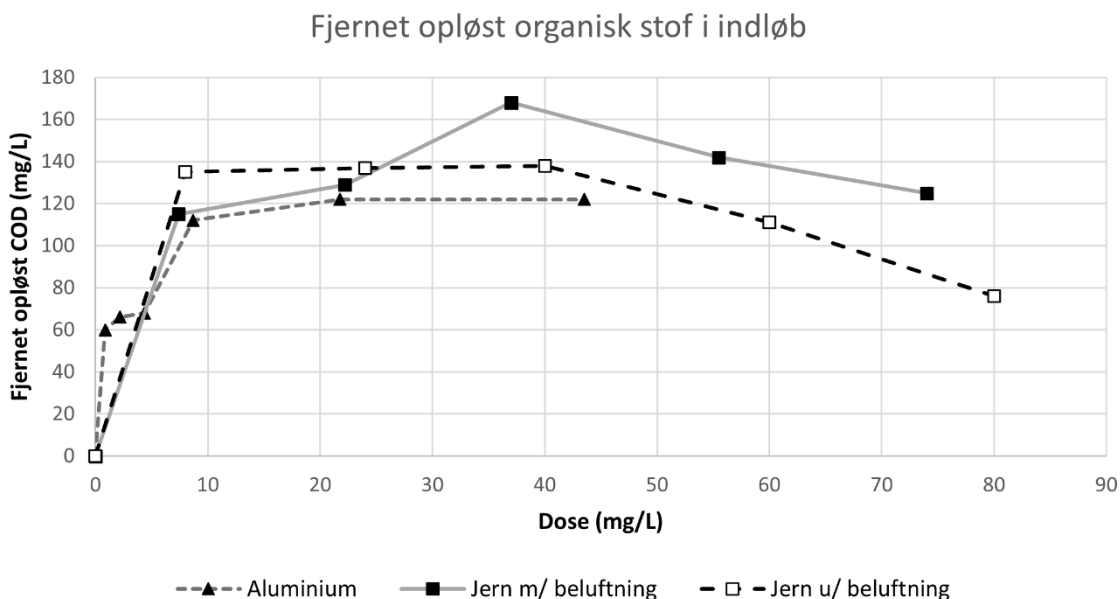
Kemiske koagulanter og flokkulanter bruges i høj grad til at reducere COD, og det er derfor vigtigt for projektet at vise, at elektrokoagulering har samme COD-reducerende egenskaber.

Udfældningen er mest effektiv ved koagulering med jern(III) ioner. [1,2] Da elektrokoagulering med jernelektroder hovedsagligt frigiver jern(II) ioner, var der på baggrund af litteraturreviewet (Appendix A) indledningsvist en bekymring om oxidationen fra jern(II) til jern(III) ville være en begrænsende faktor. Derfor blev der besluttet at udvide forsøgsrækken ved at udføre koagulering med jernelektroder med og uden beluftning, samt elektrokoagulering med aluminiumselektroder, da Aluminium frigives som Al(III) og derfor ikke er begrænset af iltniveau i vandet.

Elektrokoagulerings evne til COD-fjernelsen blev undersøgt for indløbsvand til primær fældning (spildevandstype 1). Undersøgelserne blev gennemført med aluminiumselektroder og jernelektroder med og uden beluftning. Der blev udført en måleserie med beluftning for at undersøge, om manglende oxidering fra Fe^{2+} til Fe^{3+} er en begrænsende faktor ved anvendelse af jernelektroder. Figur 2 viser den fjernede mængde opløst COD i prøverne ved forskellige doseringer af koagulant med elektrokoagulering. Doseringen er opnået ved

at have elektrokoaguleringscellen tændt i et tidsrum udregnet fra Faradays lov om elektrolyse. Koncentrationen i indløbspildevandet til de tre måleserier var 272 ± 18 mg/L før dosering. På Figur 2 ses det, at der fjernes 100-140 mg/L COD ved en dose af koagulant på 15-30 mg/L. Derefter stabiliseres mængden af fjernet COD trods yderligere tilførsel. Ved lave doser af koagulant (< 50 mg/L) viser data ikke nogen tydelig forskel i mængden af fjernet COD mellem prøver *med* beluftning i forhold til prøver *uden* beluftning. Ved højere doser af jern ses der dog en lavere effekt i fjernelse af COD *uden* beluftning i forhold til prøver *med* beluftning, hvilket kan skyldes, at mængden af ilt begrænser oxidationen af jern til jern(III). Ved doseringer over 50 mg/L ses der også at mængden af fjernet opløst COD falder. Det antages, at dette fald snarere er et udtryk for måleusikkerhed end for at mængden af fjernet COD falder. Måleusikkerheden in mente konkluderes der heller ikke at være forskel på effektiviteten af koagulering med jern og aluminiumselektroder. Den målte dosis er 74-80% af den teoretiske dose af ioner til strømmen (Faraday dose).

Effektiviteten af elektrokoagulering (EK) i forhold til traditionel kemisk koagulering (KK) blev også undersøgt eksperimentelt i laboratorieskala som beskrevet i Appendix B, men ved en fejl blev der ikke målt COD fjernelse. Her blev der dog vist, at KK med aluminium-ioner var lige så effektiv som EK til fældning i indløbspildevandet, da de med samme effektivitet reducerede turbiditeten af prøverne.



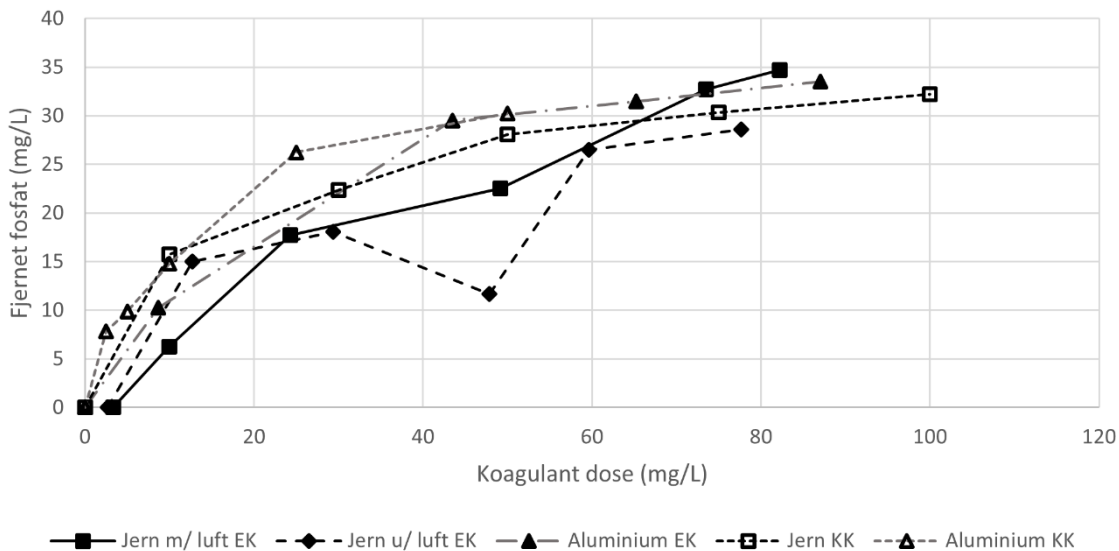
Figur 2. Opløst COD i indløbsvand til primær fældning efter elektrokoagulering. Den angivne dosis er teoretisk opnået med en elektrokoaguleringscelle tændt i varierende tid. Figur er leveret af Aalborg Universitet.

5.3.3 Reduktion af fosfat

Fosfatfjernelse er essentiel i dansk spildevandsbehandling. Laboratorieundersøgelser udført af Aalborg Universitet har vist, at elektrokoagulering er en funktionsdygtig teknologi til fosfatfjernelse i aktivt slam. Under forsøgene blev mængden af fjernet, opløst fosfat i prøver med aktivt slam (spildevandstype 2) målt før og efter kemisk koagulering og elektrokoagulering. Der blev udført fem måleserier: En for kemisk koagulering vha. hhv. aluminiumsklorid og jernklorid, en med elektrokoagulering med aluminiumselektrode og to med jernelek-

troder. Den ene af måleserierne med jernelektrode blev beluftet med ilt (2 mg/L). Mængden af fjernet, opløst orthofosfat-P for de fem måleserier er vist i Figur 3. Den oprindelige koncentration af orthofosfat-P før koagulering var $35,3 \pm 2,9$ mg/L. Den målte dosis af jern og aluminium er 81-87% af den teoretiske bestemte dose til strømmen (Faraday dose). Resultaterne viser, at der ikke er nogen tydelig forskel i effektivitet imellem elektrokoagulering og kemisk koagulering, dvs. Elektrokoagulering er lige så effektivt til fældning af fosfat i slam. Måleserien med elektrokoagulering med jernelektrode uden beluftning performer dårligere ved doser > 50 mg/L i forhold til elektrokoagulering med beluftning. Dette tyder på, at begrænset oxidation fra jern(II) til jern(III) sænker effekten af fosfatfjernelsen, hvis der ikke er tilstrækkeligt ilt (Der blev beluftet med 2 mg O₂/L svarende til iltniveauet i beluftningstanken). Da beluftning er en meget energikrævende effekt, bør elektrokoagulering fortrinsvis bruges i iltrige strømme.

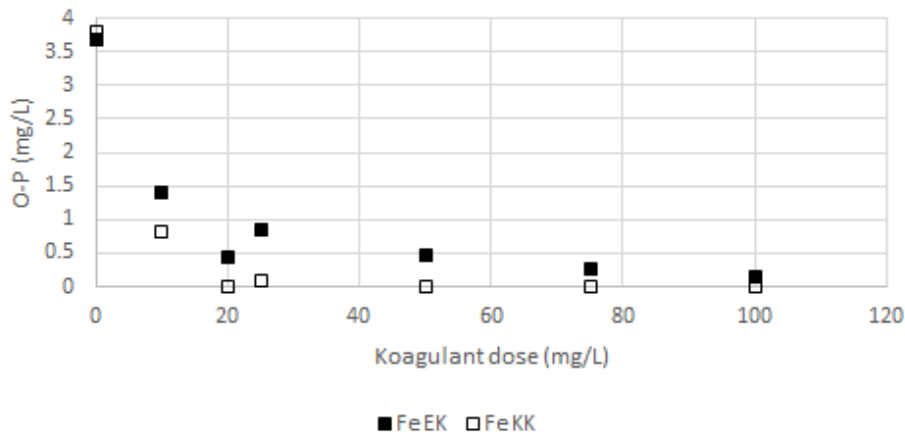
Fosfatfældning i aktivt slam



Figur 3. Fjernelse af opløst orthofosfat-P ved kemisk koagulering med hhv. aluminiumsklorid og jernklorid samt elektrokoagulering med hhv. aluminiumselektroder og jernelektroder. To måleserier udførtes med jernelektrode med og uden beluftning. Startkoncentration for orthofosfat-P var $35,3 \pm 2,9$ mg/L. Prøverne er fra juni 2020. Figur er leveret af Aalborg Universitet.

Prøver med lav koncentration af orthofosfat-P blev ligeledes undersøgt. Her kunne koncentrationen af opløst orthofosfat-P reduceres fra 3,8 til under 0,5 mg/L. Kemisk koagulering med jernklorid kunne reducere prøven til under grænseværdien ved en dosis på 10 mg/L, mens der ved elektrokoagulering skulle bruges en dosis på 20 mg/L. Resultaterne er vist i Figur 4. Elektrokoaguleringen blev udført uden beluftning, hvilket kan have hæmmet effektiviteten af fosfatfjernelsen, og det forventes, at den kan øges ved beluftning.

O-P i aktivt slam Feb 2020



Figur 4. Koncentration af opløst orthofosfat-P ved doser af jernkoagulant ved kemisk koagulering og elektrokoagulering. Prøverne er fra februar 2020. Figur er leveret af Aalborg Universitet.

5.3.4 Slamegenskaber

Egenskaberne af slammet efter elektrokoagulering er undersøgt for spildevandstype 2 (aktivt slam). Resultaterne er sammenfattet i Tabel 1. Overordnet ses ingen forskel imellem elektrokoagulering med jern- hhv. aluminiumselektroderne. Middeldiameteren og Diluted Sludge Volume Index (DSVI) er sammenlignelig for de forskellige doser og for de to elektrodematerialer. Ligeledes er capillary suction time målt for at kvantificere afvandeligheden af slammet, og hvordan denne måtte variere med elektrokoaguleringen. Der blev dog observeret at CST var lav for alle prøver og ikke ændrede sig med elektrokoagulering med hverken jern eller aluminium.

Ved dosering af kemisk koagulant vil pH falde, da der forbruges hydroxidioner ved dannelse af jernhydroxider. Ved elektrokoagulering dannes der hydroxidioner ved anoden, hvorfor der ikke ses en forsurelse ved dannelse af jernhydroxider. Ved en for kraftig elektrokoagulering vil der ses en stigning i pH på grund af dannelse af hydroxid-ioner ved anoden. I Tabel 1 ses, at pH er konstant ved lave doser, men stiger ved højere doser. Til sammenligning blev der i alle forsøg med konventionel kemisk koagulering af aktivt slam observeret et fald i pH fra ca. 6,5 til under 6. Målinger viste, at COD og opløst orthofosfat-P er reduceret til under grænseværdierne ved en dosis på 30 mg/L. Slammets pH er altså konstant for en effektiv behandling med elektrokoagulering.

Tabel 1. Egenskaber af bundfald efter elektrokoagulering med jern- og aluminiumelektroder. Der er målt, pH, Diluted Sludge Volume Index (DSVI), Capillary Suction Time (CST) og middeldiameter. Tabel lavet af Aalborg Universitet.

Dosis (mg/L)	Al (EC)				Fe EC (m/beluftning)		
	pH	DSVI (mL/g)	CST (s)	Middeldiameter (µm)	pH	DSVI (mL/g)	Middeldiameter (µm)

0	6,83	47,9	15,8	143,6 ± 207,1	6,80	44,4	110,3 ± 111,5
10	6,89	46,9	17,4	129,4 ± 190,0	6,80	-	110,1 ± 83,6
25	6,95	-	15,4	-	6,85	-	-
50	7,21	-	17,2	109,7 ± 114,9	6,97	42,3	129,0 ± 140,0
75	7,43	44,2	16,1	153,3 ± 232,6	7,27	43,5	117,4 ± 137,6
100	7,51	-	14,7	123,5 ± 149,9	7,57	-	132,6 ± 154,4

5.3.5 Oxidering af elektroder

En risiko ved elektrokoagulering er oxidering af elektroder og dermed et fald i effektivitet. Ved laboratorieforsøgene sås der ikke et fald i elektrodernes effekt over tid. For at undgå fouling af elektroderne skal prøvemængder være større end muligt inden for AP3.

5.3.6 Økonomiske og praktiske aspekter ved implementering

Laboratorieresultater viser, at elektrokoagulering kan bruges til at øge mængden af organisk primærslam samt fælde fosfor i beluftningstanke lige så effektivt som konventionel koagulering. En succesfuld implementering vil forbedre arbejdsmiljø og gøre transport af koagulanter lettere og billigere og muliggøre genbrug af metaller til koagulering i spildevandsrensning.

Økonomi

Omkostningerne til dosering af jern fra genbrugsjern kan estimeres til 3,65 kr / kg jern inklusive strømforbrug til frigivelsen fra elektroderne. Ved udregning af udgifter til elektrokoagulering er der antaget en pris på genbrugsjern på 3 kr/kg, en spændingsforskel på 1 V samt en pris på strøm på 0,66 kr/kWh. Der må dog påberegnes, at der vil være udgifter til omsmelting af genbrugsjern til jernelektroder, der kan implementeres i et anlæg, samt at der vil være udgifter til etablering af et anlæg. På Esbjerg rensningsanlæg Vest er det samlede forbrug af jern fra jernsulfat 80.000 kg/år. Hvis det skal doseres fra elektrokoagulering, vil det koste 290.000 kr/år til strøm og jern. Til sammenligning er udgifterne til jernsulfat 4,25 kr/ kg jern, hvilket vil give en udgift af koagulant på 340.000 kr. De lavere omkostninger ved dosering af jern fra elektrokoagulering skal dog sammenholdes med omkostningerne til etablering af elektrokoaguleringsanlæg.

Der må også forventes at være lavere omkostninger til transport og opbevaring af koagulanter ved elektrokoagulering. Ved elektrokoagulering skal man transportere jern og aluminium i sin rene form, dvs for hvert ton jern der skal doseres, skal der transporteres et ton jern. Ved konventionel koagulering bliver jern og aluminium til sammenligning doseret fra koncentrerede opløsninger. Eksempelvis jernsulfatopløsninger er 11,6% af masse aktivt jern, mens det ved jernklorid er 16% af opløsningen, der er aktivt jern. Derfor skal der ved konventionel koagulering transporteres 6,25-8,62 ton opløsning per ton jern, der skal doseres. Man må derfor forvente, at transportomkostningerne til koagulanttransport ved elektrokoagulering bliver 12-16% af, hvad de vil være ved konventionel koagulering.

Det er afgørende for en bæredygtig driftsøkonomi, at der ikke skal tilføres yderligere beluftning på rensningsanlæggene, end hvad der allerede er i dag. Projektets resultater viser dog, at det ikke er nødvendigt med yderligere beluftning til elektrokoagulering ved lave doseringer < 50 mg/L.

Reaktordesign

Succesfuld implementering kræver også effektiv opskalering af processen til en fuldskala kontinuert proces. Der blev i laboratorieforsøgene observeret udfordringer ved drift med kontinuert reaktor med slam, da der skete udfældninger inde i reaktoren. Derfor skal der være særligt fokus på design af kontinuert reaktor med strømningforhold, der hindrer udfældninger inde i reaktoren samt sikre optimal frigivelse af jern eller aluminium.

Opholdstiderne til elektrokoagulering ligger typisk på 1-3 min, hvilket svarer til 0,016-0,050 m³ reaktorvolumen/ 1 m³/h indløbsflow. Dette vil for et indløbsflow på 1000 m³/h svare til 16 – 50 m³ reaktorvolumener. Dette vurderes at være en udfordring, og der skal derfor være særligt fokus på design af kompakte kontinuerte reaktorer. Ved implementering til at øge mængden af slam ved primær fældning kan en elektrokoaguleringsreaktor evt. placeres umiddelbart før primær fældningstank. Ved elektrokoagulering til fosforfældning vil det være fordelagtigt at udnytte den ilt, der er til stede i det beluftede slam, hvorfor en elektrokoaguleringsreaktor vil kunne implementeres som en sidestrømsreaktor koblet på beluftningstanken eller mellem beluftningstank og bundfældningstank.

Det er derudover kendt fra andre processer, at elektroderne kan danne et oxidlag, som sænker effektiviteten af frigivelsen af jern og aluminium og derved processen. Der er derfor behov for yderligere demonstration i pilotskala for fuldt ud at kortlægge potentialet for at implementere teknologien på danske rensningsanlæg.

Ved implementering til behandling af spildevand før primær fældning bør elektrokoaguleringen kombineres med monitorering af COD, da det ikke vil være fordelagtigt at fjerne al COD før den biologiske behandling. Da der kan være store daglige udsving i COD i indløbet til rensningsanlæggene, skal COD overvåges løbende og elektrokoaguleringen styres ud fra denne.

Tabel 2. Egenskaber af bundfald efter elektrokoagulering med jern- og aluminiumelektroder. Der er målt, pH, Diluted Sludge Volume Index (DSVI), Capillary Suction Time (CST) og middeldiameter. Tabel lavet af Aalborg Universitet.

	Praktiske gevinster	Praktiske udfordringer	Økonomisk perspektiv
Indløb til primær fældning	EK kan på lige fod med KK øge slam-mængden Stabil pH	Effekt af EK ved høje doser kan være hæmmet af lave ilt-niveauer Pilotskalastudier skal belyse eventuel passivering af elektroder	Driftsomkostningerne ved EK forventes at være lavere eller sammenlignelige med KK. Etableringsomkostninger skal kortlægges ud fra skalerbare pilotskalastudier
Aktivt slam	EK kan på lige fod med KK fælde fosfor Stabil pH	Effekt af EK ved høje doser kan være hæmmet af lave ilt-niveauer Reaktorer skal designes med henblik	Driftsomkostningerne ved EK forventes at være lavere eller sammenlignelige med KK. Etableringsomkostninger skal kortlægges ud

		på at kunne håndtere (viskøst) slam Pilotskalastudier skal belyse eventuel passivering af elektroder	fra skalerbare pilotskalastudier
Udrådnnet slam	Ingen tilførsel af klorid eller sulfationer som er problematiske for senere processer (eksempelvis Anamox)	Der kunne ikke vises effekt af koagulering og at man ved EK kan sænke polymerforbrug	Hvis det kan lykkes at dosere og koagulere med elektrokoagulering, vil der være et højt potentiale for implementere EK for at sænke polymerforbrug, som er en væsentlig udgift

5.4 Konklusion

ELEKTROSEP-projektet har i AP1 til AP3 belyst elektrokoagulering til brug i dansk spildevandsbehandling. Et litteraturstudie i AP2 har gennemgået generelle udfordringer og fordele ved elektrokoagulering samt belyst fordele og ulemper ved forskellige elektrodekonfigurationer inklusive deres potentiale til at undgå elektrodefouling. Disse erfaringer bør indgå i overvejelser ved fremtidig opskalering af processen. Litteraturstudiet identificerede også følgende fordele ved elektrokoagulering:

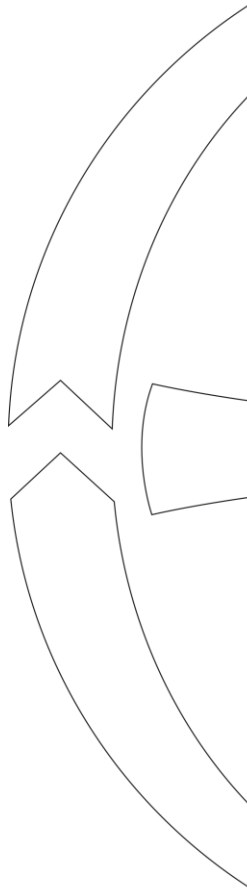
- Ingen modioner (klorid/sulfat)
- Mere effektiv koagulering. Dette kunne ikke eftervises eksperimentelt
- Lav/ingen påvirkning af pH
- Lavere driftsomkostninger
- Mindre slamproduktion
- Bedre slamafvandingssegenskaber.

Laboratorieforsøg udført af Aalborg Universitet (AP3) viste dog ikke nogen højere effektivitet af koagulering. De viste dog, at elektrokoagulering i batchforsøg kan performe på lige fod med konventionel kemisk koagulering til reduktion af COD og fjernelse af fosfor. Det blev bekræftet, at pH var konstant under elektrokoagulering ved lave doser. Endvidere vises en stabil pH inden for realistisk elektrokoaguleringsdosis.

I visse tilfælde kunne effektiviteten af koagulering med jernelektroder forbedres ved beluftning. Ellers performede jern- og aluminiumselektroder i laboratorieskala med sammenlignelig effektivitet og med samme effektivitet som kemisk koagulering. Der kunne heller ikke eftervises, at der er mindre slamproduktion eller bedre slamafvandingssegenskaber ved elektrokoagulering fremfor kemisk koagulering. Forsøg med udrådnnet slam gav negative resultater. Det udrådnede slam havde dog en høj, oprindelig jernkoncentration, og traditionel kemisk koagulering viste heller ingen effekt.

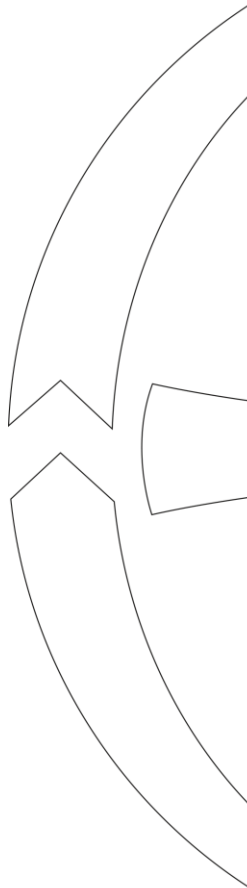
For endeligt at kortlægge potentialet af elektrokoagulering skal teknologien demonstreres i

et pilotskala system. Systemet skal designes med henblik på at bygge et så kompakt anlæg som muligt samt designe elektroder for optimal frigivelse af jern eller aluminium i viskøst slam ved at sikre højt og ensartet flow omkring elektroderne. Desuden vil længerevarende forsøg med større mængder spildevand kunne give en dybere indsigt i udfordringer med elektrodefouling. Et pilotstudium vil give en mere skalerbar forståelse af de praktiske muligheder for at implementere elektrokoaguleringen i driften samt overblik over omkostningerne ved at etablere reaktorer til elektrokoagulering. Dette vil også klarlægge udfordringer med passivering af elektroder samt hvor let doseringen kan styres over tid.



6 Litteraturliste

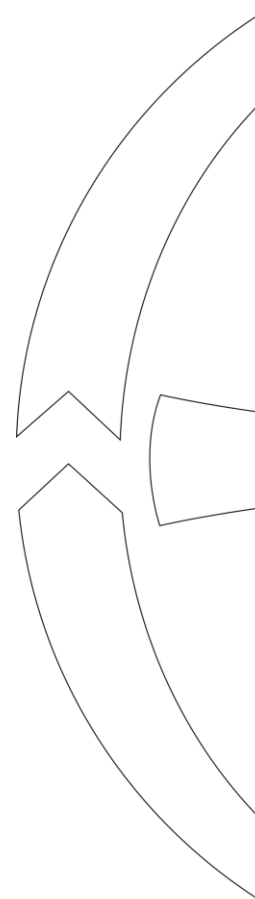
1. Moussa, D.T., et al., A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment (2017): Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management* 186, p. 24-41.
2. Hakizimana, J.N., et al., Electrocoagulation process in water treatment (2017): A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination* 404, p. 1-21.



7 Appendiks

Appendiks 1: Litteraturreview udført af Teknologisk Institut

Appendiks 2: Forsøg udført af Aalborg Universitet



Appendix 1: Litteraturreview

Se vedlagt dokument



Appendiks 2: Forsøg udført af Aalborg Universitet

EC til at øge COD fjernelse ved primær fældning

Indløbsvand til primær fældning fra Esbjerg Vest Renseanlæg blev fragtet til Aalborg Universitet for koaguleringsstests. Testene blev udført i et måleglas med 500 mL indløbsvand under kraftig magnetomrøring. Der blev påført en strøm på 200 mA i det antal minutter (se Tabel 1), der passer med den ønskede dosering jf. Faradays lov:

$$m = \frac{I t M_w}{Z F} \quad (1)$$

Hvor m er massen, der skal doseres, I er strømstyrken, t er doseringstiden, M_w er molar-massen af enten jern eller aluminium, Z er antal elektroner i reaktioner (=2 for Fe) og F er Faradays konstant. Elektroderne havde et areal på 240 cm², hvilket giver en strømdensitet på 8,3 A/m².

Tabel 1: Doseringstider for dosering af jern (Fe) og aluminium (Al) brugt til elektrokoagulering i vand til indløb til primær fældning.

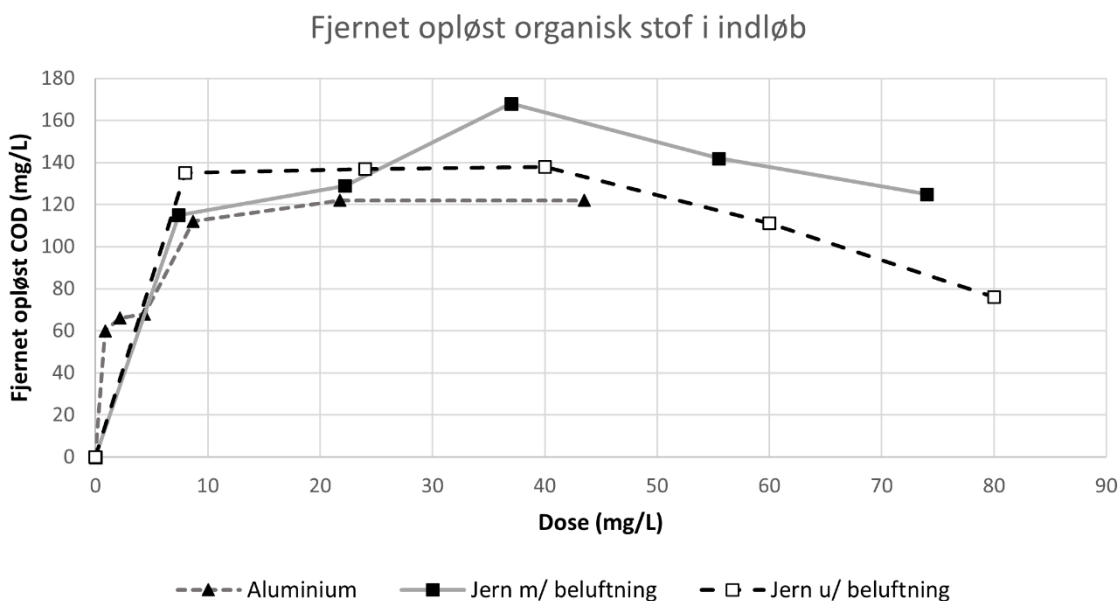
Dose De (mg/L)	Doseringstid Fe (s)	Dose Al (mg/L)	Doseringstid Al (s)
0	0	0	0
10	86	2,5	67
30	259	5	134
50	431	10	268
75	647	25	670
100	862	50	1341

Efter dosering med elektroderne blev prøverne sat til let omrøring i 15 min. Ved EC med jern blev der ydermere udført forsøg med og uden beluftning for at nå iltkoncentrationer på hhv. 6 og 0 mg O₂/L.



Figur 1: Bægerglas med elektroder (til venstre) samt bægerglas med indløbsspildevand med varierende doser af Fe fra EC (dosen stiger fra venstre mod højre).

Ved elektrokoagulering blev det ved både aluminium- og jernelektroder påvist, at koncentrationen af opløst organisk stof (målt som COD) faldt med højere dose af Fe eller Al ioner, hvilket fremgår af Figur 2. Dosen på x-aksen er teoretisk, dvs. den er bestemt ud fra den strømstyrke og tid, der er brugt for behandling og beregnet ved Faradays lov. Derfor angives den "Faraday dose". Målinger af koncentration af jern og aluminium med atom absorptions spektrometri viste, at den faktiske dose var mellem 74-80% af Faraday dosen.

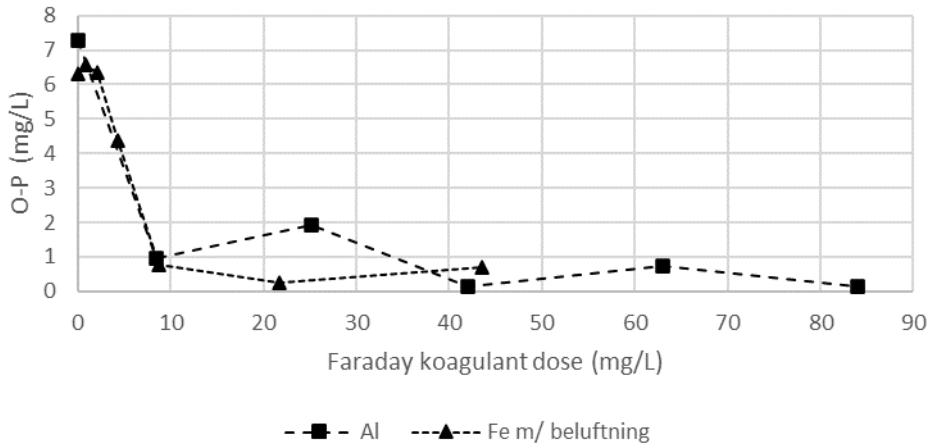


Figur 2: Udvikling i koncentrationen af opløst COD i indløbsspildevand med højere dose jern (Fe, med og uden beluftning) og Aluminium (Al, venstre graf) samt udviklingen i mængden af opløst COD (højre graf).

Ved en dose på 25-30 mg koagulant per liter spildevand er fjernelsen mellem 40 og 60 procent (Figur 2). Yderligere dosering af koagulant har ikke nogen effekt på fjernelsen af COD. Der kan heller ikke konstateres nogen signifikant forskel i fjernelse mellem koaguleringer med aluminium og jern (under beluftning og ikke). Det skal bemærkes at indløbskoncentrationen af COD i det anvendte spildevand allerede er lav, da det anbefales ikke at nedbringe COD koncentrationen til under 300 mg/L før sekundær (biologisk) rensning. Det vil derfor i praksis i de fleste tilfælde være realistisk at dosere med op til 10 mg jern eller aluminium per liter spildevand.

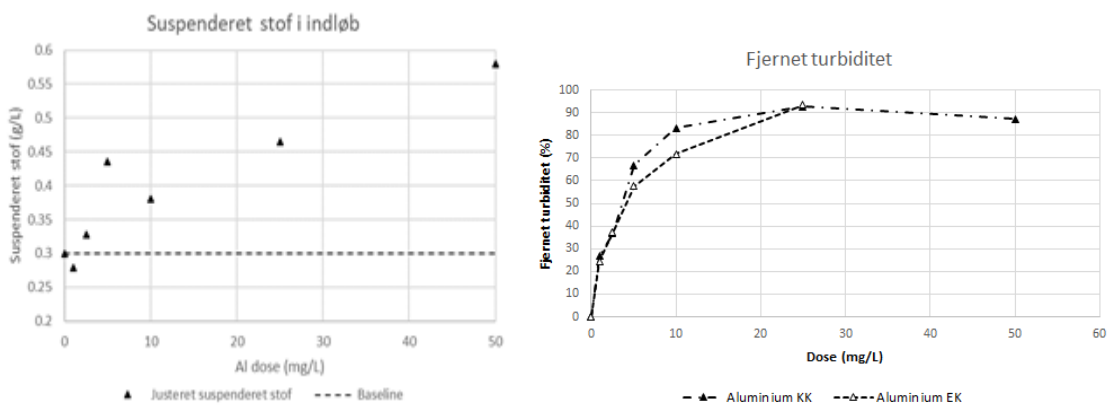
Udover at sænke koncentrationen af organisk stof, sænker elektrokoaguleringen også koncentrationen af fosfat ved udfældning mellem jern eller aluminium. Figur 3 viser udviklingen i koncentration af orthofosfat-P (o-P) målt i supernatant efter centrifugering (200 g i 3 minutter) af spildevand koaguleret ved varierende doser af jern og aluminium. Allerede ved en dose på 10 mg/L aluminium og jern er der under 2 mg/L O-P i væskefasen, mens de resterende er i bundfaldet, hvilket vil svare til det primære slam.

O-P koncentration i indløb ved EC



Figur 3: Koncentration af orthofosfat-P i supernatant efter centrifugering af spildevand koaguleret ved varierende doser jern og aluminium.

Som det ses af Figur 4 (venstre) så stiger koncentrationen af suspenderet stof ved højere doser af koagulant fra elektrokoagulering. Ved en dose på 10 mg/L aluminium er koncentrationen af suspenderet stof steget fra 0.3 g/L til 0.37 g/L (korrigeret for tilførslen af aluminium). Figur 4 (højre) viser udviklingen i reduktionen i turbiditet ved forskellige doser af aluminium ved elektro- og kemisk koagulering. Her ses der ikke nogen entydig forskel i effektiviteten de to metoder imellem.



Figur 4: Suspenderet stof koncentration (korrigeret for koagulanttilførsel) i spildevandet ved varierende doser aluminium fra elektrokoagulering (højre) samt reduktion af turbiditet ved forskellige doser aluminium fra kemisk (KK) og elektrokemisk koagulering (EK).

Fosforfældning i aktivt slam

Aktivt slam blev udtaget fra anaerobe tanke på Kolding Centralrenseanlæg. Prøverne blev elektrokoaguleret på AAU med henblik på at sænke koncentrationen af opløst fosfor. Der

blev doseret med aluminium og jern både ved elektrokoagulering (EK) og konventionel koagulering (KK). Doseringen med EK skete i batch mode med en konstant strømstyrke på 0,2 A (strømdensitet 8,3 A/m²). Tabel 2 giver et overblik over doserne samt doseringstider. EC med jern blev igen gentaget med og uden beluftning, hvor iltniveauet med beluftning blev indstillet til 2 mg O₂/L, svarende til iltniveau i beluftningstanke, mens det uden beluftning var ca. 0 mg O₂/L.



Figur 5: Forsøgsopstilling med batch elektrokoagulering af slam fra BlueKolding renselanlæg.

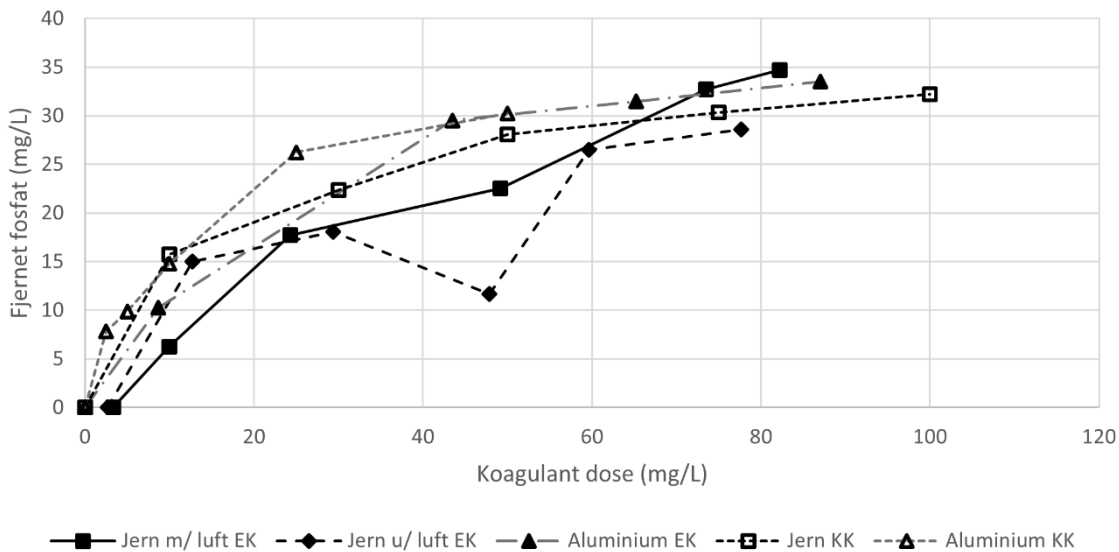
Tabel 2: Doseringstider for dosering af jern (Fe) og aluminium (Al) brugt til elektrokoagulering af fosfor i slam.

Dose (mg/L)	Doseringstid Fe (s)	Doseringstid Al (s)
0	0	0
10	86	268
25	216	670
50	431	1341
75	647	2011
100	862	2682

Figur 6 viser fjernelse af opløst O-P som funktion af målt dose af koagulanter. Den målte dosis er 81-87% af den teoretiske dosis bestemt af strømmen (Faraday dose). Overordnet viser KK og EK sammenlignelig effektivitet i fjernelse af O-P, og ligeledes viser data ikke nogen forskel i effektivitet mellem aluminium og jern. Ved højere doser af koagulant (>50 mg/L) har dosering af jern mindre effekt, hvis ikke iltniveauet justeres til 2 mg O₂/L, som

ofte er koncentrationen i beluftningstanken. Dette skyldes formentlig at oxidationen af frigivet Fe(II) til Fe(III) er begrænset af lavt iltniveau ved høje doser.

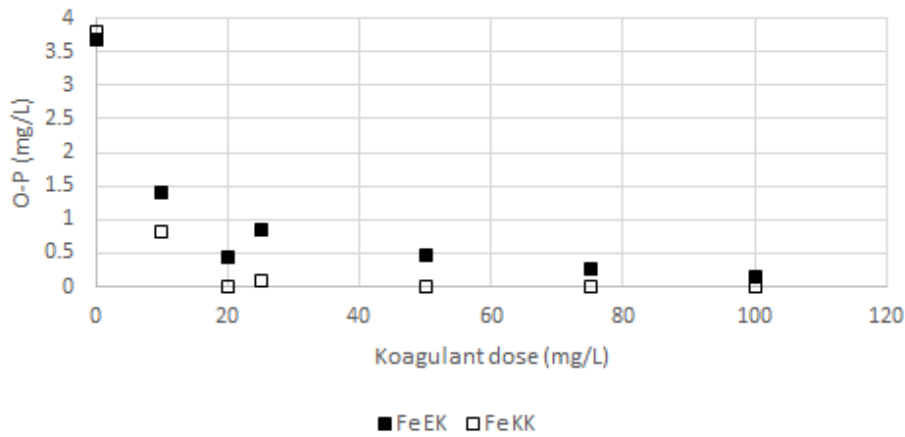
Fosfatfældning i aktivt slam



Figur 6: Mængden af fjernet opløst orthofosfat-P ved varierende doser af jern og aluminium ved EK og KK.

Ved EC blev opløst COD reduceres med 25% ved 30 mg/L Fe dosering og 12% ved 10 mg/L Fe dosering. Opløst O-P i prøverne i Figur 6, samlet i Juni 2020, var $35,3 \pm 2,9$ mg/L. Figur 7 viser udviklingen i koncentration af opløst O-P i Februar 2020, hvor startkoncentrationen var 3,8 mg/L. Her blev der observeret højere effektivitet af P-fældning med jern ved konventionel koagulering end elektrokoagulering. Dog blev EK udført uden beluftning. Ved EK kom O-P koncentrationen under grænseværdien ved en dose på 30 mg/L, mens dosen ved KK var 10 mg/L for at komme under grænseværdien.

O-P i aktivt slam Feb 2020



Figur 7: Opløst koncentration af O-P i slamprøver i februar som funktion af dosering af jern fra EK og KK.

Effekten af EC på slammets pH, slamvolumen (målt med DSVI ved 2x fortynding), afvandingsegenskaber (CST) og flokstørrelse blev målt ved dosering med aluminium og jern og er opsummeret i Tabel 3.

Tabel 3: pH, DSVI, CST og flokstørrelse af slam behandlet med EC med aluminium og jernelektroder.

Dose (mg/L)	Al (EC)				Fe EC (m/ beluftning)		
	pH	DSVI (mL/g)	CST (s)	Middel-diameter (µm)	pH	DSVI (mL/g)	Middel diameter (µm)
0	6,83	47,9	15,8	143,6 ±207,1	6,80	44,4	110,3 ±111,5
10	6,89	46,9	17,4	129,4 ±190,0	6,80	-	110,1 ±83,6
25	6,95	-	15,4	-	6,85	-	-
50	7,21	-	17,2	109,7 ±114,9	6,97	42,3	129,0 ±140,0

75	7,43	44,2	16,1	153,3 ±232,6	7,27	43,5	117,4 ±137,6
100	7,51	-	14,7	123,5 ±149,9	7,57	-	132,6 ±154,4

Der blev umiddelbart ikke observeret nogen ændring i afvandingsegenskaberne, og CST var lav for alle prøver. Der var heller ikke nogen klar tendens for ændring af flokstørrelse ved højere dose af koagulanter. Det samme er tilfældet ved DSVI. Der blev dog ved flere prøver observeret dannelse af et slamtæppe, se Figur 8. Dette kan skyldes slamflotation, som kan opstå af bobler af brint dannet på katoden. Ydermere kan der observeres ved EC, at pH stiger med højere dose af koagulant. Op til 25 mg/L var der en begrænset stigning under 0,15, mens en mere signifikant stigning observeres ved højere doser.



Figur 8: Prøver med slam, efter EC, hvor prøven til venstre viser dannelse af et svævende tæppe af slam.

Forbedring af flokkulering og afvanding på udrådnet slam

Udrådnet slam fra Grindsted Renseanlæg, Billund Vand & Energi (Anammox) blev sendt til AAU for elektrokoagulering med henblik på at kunne sænke polymerforbruget før afvanding. Slammet blev koaguleret med konventionel- og elektrokoagulering med jern. Slammet havde en suspenderet stof koncentration på 33.6 g/L. Figur 9 viser den målte koncentration af jern i slammet ved forskellige teoretiske doser af jern ved elektrokoagulering.

Jernfrigivelse I udrådnet slam

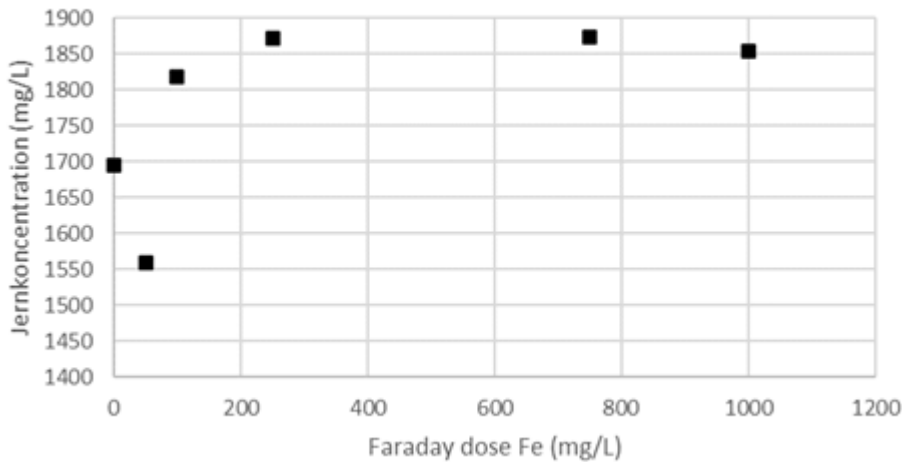


Figure 9: Målt koncentration af jern I udrådnet slam fra Grindsted Renseanlæg (Billund Vand & Energi)

Målinger af jernkoncentrationer i udrådnet slam viste en høj baggrundskoncentration af jern. Derudover stiger koncentrationen af jern ikke i takt med den øgede teoretiske dosering. Dette kan til dels skyldes den høje baggrundskoncentration, hvilket gør det svært at detektere små ændringer i koncentrationen fra bidraget fra frigivelse af jernioner fra elektroderne. Derudover er det muligt, at der er sket sidereaktioner ved elektroderne, og derfor ikke er frigivet den forventede mængde jernioner.

Konventionel koagulering med tilsætning af jernklorid blev udført for at undersøge i hvor høj grad, det kan bidrage til ladningsneutralisering af slammets partikler, hvilket vil kunne sænke mængden og ladningen af polymer til flokkulering derved til at sænke omkostningerne ved før afvandning. Målinger af zetapotential viste dog ingen reduktion af overfladeladning i ved doseringer på 50-4000 mg Fe/L (zetapotential ca. -20 mV). Dette skyldes potentielt den høje baggrundskoncentration af ioner i væsken, som gør det svært at ladningsneutralisere yderligere.

Slamprøver koaguleret ved en dosering på 500 mg Fe/L blev yderligere flokkuleret med en polymer svarende til den, der bruges ved Grindsted Renseanlæg. Der blev ikke observeret nogen forskel i slammets egenskaber i form af CST og residualturbiditet (dvs turbiditet af supernatanten efter centrifugering v. 200 g i 3 min). Der blev heller ikke observeret nogen forskel i den påkrævede mængde polymer, der skulle bruges til at flokkulere slammet.

7.1 Konklusioner

- Elektrokoagulering med både jern og aluminiumselektroder kan effektivt øge mængden af slam ved primær fældning. Der skal bemærkes, at fosfat også fældes i denne proces.
- Elektrokoagulering virker lige så effektivt til fosforfældning i aktivt slam som dosering med f.eks. jernklorid. Ved lave doser (< 25 mg/L) sker der en beskedent stigning i pH og ingen ændring i slammets bundfældningsegenskaber. Dog var der en

tendens til dannelse af slamtæppe. Det var ikke nødvendigt at tilføre ekstra ilt ved beluftning ved lave doser af koagulant (<50 mg/L)

- Elektrokoagulering viste sig ikke effektiv til behandling af udrådnat slam før afvanding, da der var lav effektivitet og intet bidrag til ladningsneutralisering og dermed sænkning af polymeromkostninger.

