



Miljø- og
Fødevareministeriet
Naturstyrelsen

Genanvendelse af Fosfor og Kvælstof ved inddampning af rejektvand

GAFOKIR projekt

2016

Titel:

Genanvendelse af Fosfor og Kvælstof ved
inddampning af rejeftvand

Projektgruppe:

BIOFOS,
Envidan,
KU Science

Udgiver:

Naturstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

Redaktion :

Joakim Faxå & Jeanette Agertved Madsen, EnviDan
Dines Thornberg, BIOFOS
Camilla Lemming, KU Science

www.nst.dk

År:

2016

ISBN nr.

978-87-7175-550-3

Ansvarsfraskrivelse:

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord.....	6
1. Indledning	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Formål, mål og succeskriterier (fra ansøgning).....	9
2. Miljøeffekter og nyhedsværdi	12
2.1 Miljøeffekter	12
2.2 Teknologisk nyhedsværdi	12
3. Teori	14
3.1 Inddampning	14
3.2 Mineralske stoffer	14
3.3 Hygiejnisering.....	16
3.4 Organisk materiale.....	16
3.5 Fosfor.....	17
3.6 Kvælstof.....	17
4. Screeningsforsøg.....	19
4.1 Formål	19
4.2 Forsøgsopstilling.....	19
4.3 Resultater	19
Forsøg 1	19
Forsøg 2	19
4.4 Delkonklusion	20
5. Pilotforsøg	21
5.1 Formål	21
5.2 Opbygning af pilotanlægget.....	21
5.3 Forsøgsopstilling.....	23
5.4 Forsøgsplan	24
5.5 Sammensætning af rejeckt vandet.....	25
5.6 Procesforhold	26
5.7 Prøvetagnings- og analyseprogram.....	26
5.8 Resultater uden pH justering	27
5.8.1 Forsøg 2 – Test.....	27
5.8.2 Forsøg 3 – Forsøg uden pH justering.....	28
5.9 Resultater med pH justering	32
5.9.1 Forsøg 4 – test.....	32
5.9.2 Forsøg 4.1 – Forsøg med pH justering	33
5.9.3 Ekstraforsøg fra Vapotec	36
5.10 Delkonklusion - pilotforsøg	38
5.10.1 Analyseusikkerhed	38
5.10.2 Genvinding af næringsstoffer	38

5.10.3	Tungmetaller	39
5.10.4	Miljøfremmede stoffer	39
5.10.5	Hygiejnisering	39
6.	Vurdering af fosforgødningspotentiale	41
6.1	Metode.....	41
6.1.1	Produkter.....	41
6.1.2	Potteforsøg	42
6.1.3	Inkubationsforsøg	42
6.2	Resultater	42
6.2.1	ICP-analyse på produkterne	42
6.2.2	Potteforsøg	43
6.2.3	Inkubationsforsøg	45
6.3	Diskussion	46
6.4	Konklusion	47
7.	Business case og markedspotentiale	48
7.1	Forfiltrering af rejeckt vandet	48
7.2	Inddampningsanlæg	48
7.3	Øvrige anlægs omkostninger	49
7.3.1	Tanke og rør	49
7.3.2	El og SRO	49
7.3.3	Samlet investering.....	49
7.4	Driftsudgifter	49
7.4.1	pH regulering	49
7.4.2	Energi til inddampning.....	50
7.5	Besparelser på hovedanlæg	50
7.5.1	Værdi af produceret gødning	50
7.5.2	Anlægskapacitet	50
7.6	Nutidsværdiberegning	51
7.7	Markedspotentiale	51
8.	Konklusion.....	53
9.	Perspektivering	54
10.	Formidling	56
	Referencer	57
	Bilag.....	58

Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af udviklingsprojektet ” Genanvendelse af Fosfor og Kvælstof ved inddampning af rejeftvand” , der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriets program for Grøn Teknologi 2013

Projektgruppen har bestået af:
BIOFOS, Envidan og KU Science

I følgegruppen har, udover projektgruppen, Naturstyrelsen også deltaget v/Joannes Gaard

Sammenfatning

I takt med, at det lettest tilgængelige råfosfat reserver bliver opbrugt, stiger omkostningerne til at udvinde fosfor. Dette medfører en stigning i markedsprisen for råfosfat, hvilket gør genvinding af fosfor fra tilgængelige ressourcer f.eks. spildevand interessant.

Overskydende vand fra afvanding af udrådnat spildevandsslam (rejektvand) indeholder en del fosfor og kvælstof, der har et genbrugspotentiale som gødning. Rejektvandet er i sig selv for tyndt til at blive anvendt som gødning med i en mere koncentreret form kunne det anvendes som flydende gødning.

Formålet med udviklingsprojektet er, at introducere og udvikle ny inddampningsteknologi til genvinding af fosfor og kvælstof fra rejektvand, der stammer fra afvanding af udrådnat slam på kommunale renseanlæg. Resultaterne fra pilotforsøg med inddampning af rejektvand fra BIOFOS Renseanlæg Avedøre kan sammenfattes som nedenstående:

- Det er teknisk muligt at inddampe rejektvandet ca 30 gange.
- Fosfor forbliver i koncentratet (gødningsproduktet), og der sker en udfældning af amorft materiale som indeholder ca. 11 % fosfor.
- Forsøgene indikerer at det er muligt at styre fordelingen af det opløste kvælstof mellem koncentratet og destillatet ved at kontrollere pH i reaktoren. Ved optimeret pH styring forventes det at være muligt at fordele størstedelen til koncentratet hvis det er ønskeligt.
- Koncentratet (gødningsproduktet) forventes at kunne overholde slambekendtgørelse for udbringning på landbrugsjord både med hensyn til indholdet af tungmetaller og miljøfremmede stoffer.
- Ved en driftstemperatur over 65 °C i inddampningsanlægget forventes det at koncentratet (gødningsproduktet) er stabilt hygiejniseret.
- Pottforsøg har vist at bundfald fra det inddampede rejektvand har en fosforgødningsværdi, som modsvarer konventionelt Tripel Super Phosphat og koncentratet på niveau med struvit.

I udviklingsprojektet er opstillet en business case baseret på data fra pilotforsøget samt forudsætninger for implementering af en fuldskala løsning på Renseanlæg Avedøre til 320.000 PE. Business casen viser at metoden er relativt omkostnings- og energitung, hvilket anbefales at optimere i forbindelse med videre udvikling af teknologien sammen med afklaring af afsætningsmulighed af produktet. .

Summary

Excess water from the dewatering of the digested sludge (reject water) contains phosphorus and nitrogen, which has a potential for re-use as fertilizer.

Reject water in itself is too diluted to be used as fertilizer, but in a more concentrated form it might be used as a liquid fertilizer.

Experiments with a pilot plant at WWTP Avedøre have shown that it is technically possible to concentrate the reject water 30 times by evaporation.

The method is relatively costly and energy intensive.

The specific results from the pilot trials of reject water evaporation at the BIOFOS wastewater treatment plant Avedøre can be summarized as follows:

- Phosphorus remains in the concentrate (the fertilizer), and a deposition of amorphous material containing approximately 11% phosphorus is taking place.
- The trials indicate that it is possible to control the distribution of the dissolved nitrogen of the concentrate and the distillate by controlling the pH in the reactor. By optimized pH control it is expected to be possible to keep the majority of the nitrogen in the concentrate if desired.
- The concentrate (the fertilizer) is expected to comply with the present environmental standards for sludge recovery on farmland both in terms of the content of heavy metals and hazardous substances.
- At an operating temperature of $> 65^{\circ}\text{C}$ in the evaporation plant, the concentrate (the fertilizer) is hygienized.
- Pot Tests have shown that the evaporated reject water has an excellent effect as phosphorus fertilizer

1. Indledning

1.1 Baggrund

Alle levende organismer har brug for stofferne nitrogen og fosfor for at leve. Disse to stoffer er ligeledes plantenæringsstoffer og er derfor af stor betydning for optimal dyrkning af afgrøder.

Fosfor skal tilføres afgrøderne igen og igen, for at erstatte det der høstes og det der udvaskes af jorden. Afledt af det stigende befolkningsantal i verden vil behovet for det essentielle næringsstof fosfor dermed også stige. I dag udvindes fosfor hovedsagelig fra ikke-fornybare fosforminer og dermed er fosfor i fremtiden en begrænset ressource i verden. Samtidig udvindes hovedparten af råfosfaten i dag fra miner i Marokko og Kina, hvilket på sigt kan være kritisk. I takt med, at det lettest tilgængelige råfosfat reserver bliver opbrugt, stiger omkostningerne til at udvinde fosfor. Dette medfører en stigning i markedsprisen for råfosfat, hvilket gør genvinding af fosfor fra tilgængelige ressourcer f.eks. spildevand interessant.

På baggrund af dette, er særligt genvinding af næringssaltet fosfor blevet et meget vigtigt emne og sat på den politiske dagsorden i Danmark. En mulig kilde til genvinding af fosfor er fra spildevand og den genererede slamfraktion. På landsplan akkumuleres årligt i alt ca. 4.000 tons fosfor (P_2O_5) i det danske spildevandsslam og til sammenligning er der et forbrug, af handelsfosfor, på ca. 15.000 ton pr. år i Danmark (Miljøprojekt 1460)

Den generelle bekymring ved, at anvende næringssalte i form af spildevandsslam, til gødning af afgrøder, er indholdet af tungmetaller og miljøfremmede stoffer og disses akkumulering i jorden. Spildevandsslam, der i dag anvendes til gødnings – eller jordbrugsformål udgør ca. 50 % af den samlede slammængde, mens ca. 24% forbrændes uden udnyttelse af næringsstofferne (Miljøprojekt 1460).

Lovgivningen tilskriver i dag at spildevandsslam, jf. Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Slambekendtgørelsen), må genanvendes som gødningsmedie på landbrugsjord såfremt en række parametre på tungmetaller og miljøfremmede stoffer overholdes. Om lovgivningen i fremtiden vil ændre sig på dette område er usikkert, men i så fald restriktionerne skærpes eller det i fremtiden ikke længere er ønskeligt at udbringe spildevandsslam til jordbrugsformål er det særlig interessant at kigge på teknologier der muliggør udvinding og adskillelse af de nyttige næringssalte som kvælstof og fosfor og dermed adskille dem fra slamfraktionen.

1.2 Formål, mål og succeskriterier (fra ansøgning)

Formålet med udviklingsprojektet er, at introducere og udvikle ny inddampningsteknologi til genvinding af fosfor og kvælstof fra rejecktand, der stammer fra afvanding af udrådet slam på kommunale renseanlæg. Ved inddampning kan kvælstof og fosfor opkoncentreres og udtages som et koncentrat. I udviklingsprojektet skal foretages en fastlæggelse af kvaliteten af det producerede koncentrat og en vurdering af muligheder for direkte anvendelse eller oparbejdning af dette koncentrat som gødningsmedie.

Projektet har endvidere til formål, at kortlægge indflydelse af temperatur, pH forhold og egenskaber i det indkommende rejecktand/egnet delstrøm på funktionen af teknologien, kvalitet på koncentratet og en evt. separat strøm med NH_3 -holdigt vand som kan udgøre et anvendeligt biprodukt fra

inddampningsprocessen. Påvirkninger i form af belægninger og andre driftsforstyrrelser skal ligeledes kortlægges. Indhold af miljøfremmede stoffer og tungmetaller i produktet skal belyses.

Udover det primære mål beskrevet ovenfor er formålet, at opstille den samlede energibalance for teknologien, herunder energiforbrug til inddampning, besparelser på hovedanlægget i form af reducerede ilt-, energi- og kemikalieforbrug, anvendelse af overskudsvarme til opvarmning af rådnetanke, slamproduktion etc.

Indledningsvist gennemføres laboratorieforsøg idet inddampningsteknologien ikke tidligere har været anvendt til genvinding af fosfor og kvælstof fra rejektivand fra renseanlæg. Formålet med laboratorieforsøgene er gennem screeningsforsøg at opstille et udgangspunkt for en række procesmæssige parametre. Efterfølgende udvikles teknologien i pilotskala og herunder fastlægges optimale driftshold, der skal danne grundlag for opskalering til fuldskalastørrelse. Dermed er projektets første succeskriterie at de indledende screeningsforsøg i laboratorium, viser at det er muligt at genvinde fosfor og kvælstof ved den anvendte inddampningsteknologi og at projektet derfor kan fortsætte i pilotskala.

Udvikling og afprøvning af teknologien i pilotskala udføres på Renseanlæg Avedøre under BIOFOS, som er et kommunalt renseanlæg med en kapacitet til rensning af spildevand fra 320.000 personer (PE). Rejektivand fra afvandet udrådet slam anvendes som input til inddamperen. Med udgangspunkt i de opnåede resultater og erfaringer fra de indledende screeningsforsøg, er succeskriteriet for denne fase at resultaterne fra laboratorieskala i rimelig grad kan overføres til pilotskala med produktion af koncentrat og interessante biprodukter til følge.

Udvalgte produkter fra pilotforsøgene videreføres til forsøg der skal dokumentere produkternes gødningsværdi. KU-Science står for afprøvning af gødningsværdien i koncentratet gennem dyrkningsforsøg. For at opfylde projektets mål skal der ved projektets afslutning foreligge dokumentation af gødningsværdi og produkternes kvalitet, herunder en vurdering af eventuelle anvendelige biprodukter.

På baggrund af de opnåede resultater fra pilotforsøgene opstilles en business case, der belyser potentialet ved implementering af genvinding af nærringssalte ved inddampning i fuldskala. Endelig skal udviklingsprojektet bidrage med resultater der kan inspirere til videreudvikling af teknologien, det rette datagrundlag og videreformidling af erfaringer opnået ved dette projekt.

Nedenfor ses projektets mål og succeskriterier fra den oprindelig ansøgning.

Projektets mål	Succeskriterier – [hvordan ved du at målet er nået?]
Screeningsforsøg i laboratorieskala	Forsøg udført jf. protokol. Gode data til pilotforsøg
Udvikle inddampningsteknologi til produktion af gødningsprodukt fra rejektivand i pilotskala	Forsøg udført jf. protokol. Teknologi demonstreret i skala. Gode data til business case
Dokumentation af gødningsværdi af produktet	Positiv respons i dialog med landbrug og gødningsproducenter. Ekspertvurdering af produktet foreligger.

Dokumentation af sammensætning og anvendelighed af biprodukt	Potteforsøg udført jf. protokol
Opstille business cases for den udviklede teknologi	Business cases foreligger for genanvendelse af fosfor og kvælstof ved ny udviklet inddampningsteknologi

2. Miljøeffekter og nyhedsværdi

2.1 Miljøeffekter

Ved implementering af inddampningsteknologi til genvinding af fosfor og kvælstof fra rejeftvand er der potentiale for, at reducere en lang række miljøeffekter forbundet med rensning af kommunalt spildevand herunder:

- Reduceret drivhuseffekt ved mindre CO₂ emission
- Reduceret forbrug af knappe energiråstoffer ved mindre energiforbrug og øget biogasproduktion
- Reduceret ressourceforbrug (fædningskemikalier)
- Genvinding af en ikke fornybar ressource (fosfor)
- Substituering af energitungt ammonium til kunstgødning
- Reduceret eutrofiering ved reduceret udledning af næringssalte

Projekt GAFOKIR vil effektivisere næringssaltfjernelsen fra spildevand ved at starte en god cirkel. Normalt vil rejeftvand fra en slamafvanding returneres til renseanlæggets hovedstrøm, hvor det belaster den kemisk-biologiske næringssaltfjernelse. Det er muligt at bryde dette mønster og i stedet starte en god cirkel, som begynder med fjernelsen af fosfor og kvælstof fra rejeftvandet. Hermed belastes næringssaltfjernelsen i hovedstrømmen (luftningstankene) mindre. Der skal således anvendes både mindre energi til beluftning, fædningskemikalie og kulstof. Herved reduceres energiforbrug og slamproduktionen, og der vil kunne 'ekstraheres' mere organisk stof i primær trinnet til rådnetankene med hensyn på øget biogas produktion. Formodentlig vil man også kunne øge andelen af fosfor, der kan fjernes biologisk fremfor kemisk ved fældning. Som en udløber af dette vil der kunne trækkes endnu mere fosfor ud via rejeftvandet da det biologisk indbyggede fosfor vil være mere tilgængeligt sammenlignet med det kemisk fældede fosfor. Hvis slammet forbrændes vil det indeholde en reduceret mængde 'døde' uorganiske metalsalte og derfor danne mindre aske. Hvis slammet udspreddes på landbrugsjord vil plantetilgængeligheden formentlig øges idet andelen af fædningskemikalier og dermed kemisk bundet fosfor reduceres.

2.2 Teknologisk nyhedsværdi

Udviklingsprojektet GAFOKIR fokuserer på introduktion og udvikling af en ny teknologi til genvinding af fosfor og kvælstof. Dermed er der potentiale for, med udgangspunkt i de indledende pilotforsøg at danne grundlag for videreudvikling en højeffektiv vakuuminddampningsteknologi til fremstilling af et kommercielt gødningsprodukt ud fra spildevands indhold af næringssaltene fosfor og kvælstof. Projektet anses derfor på sigt at bidrage til at Danmark er i front indenfor genvinding af den ikke fornybare ressource fosfor og genvinding af næringssalte fra renseanlæg og erstatte handelsgødning.

Rejeftvand fra afvanding af slam har længe været i fokus fordi det repræsenterer en høj intern belastning af renseanlæg og samtidig har godt potentiale til genanvendelse af fosfor og kvælstof pga. en relativ høj koncentration. De eksisterende teknikker til separat behandling af rejeftvand indebærer ikke alle en genanvendelse af næringssaltene. Mest udbredt er nok pt. biologiske processer til fjernelse af kvælstof, som f.eks. via nitrifikation/denitrifikation eller ANAMMOX baserede processer, og som dermed ikke adresserer hverken genanvendelse af kvælstof eller fosfor.

I fremtidens renseanlæg anses spildevandet som en ressource som skal udnyttes intelligent og miljøeffektivt. Dette kræver udvikling af nye helhedsorienterede innovative løsninger. Udvikling af en inddampningsteknologi til genvinding af både fosfor og kvælstof fra spildevand vil bidrage til udvikling af teknologier der fordrer helhedsorienteret håndtering af ressourcerne på kommunale renseanlæg. Inddampningsteknologien er ikke tidligere anvendt til dette formål og der foreligger derfor ingen sammenlignelige resultater eller deslige erfaringer fra lignende forsøg med denne teknologi, men teknologien anses som udgangspunkt for velegnet sammenlignet med andre kommercielle teknologier.

Der findes i dag allerede kendte teknologier til genvinding af fosfor via udfældning af struvit (Fosforgenvinding ved struvitudfældning (2014), Fosforpartnerskabet: Miljøprojekt 1460 (2013)). Genvinding af fosfor via struvit kræver erfaringsmæssigt meget specifikke betingelser og tilsætning af dyrt Magnesium og adresserer desuden ikke genvinding af kvælstof. Anlæg til stripping af ammoniak fra rejeftvand, blev opført få steder i 90'erne og senere opgivet da processen var dyr og produktet for tyndt til at interessere aftagerne.

Ved introduktion af vakuuminddampningsteknologi til genvinding af både kvælstof og fosfor søges det at introducere en simpel teknologi til genvinding af næringssalte som ikke har samme specifikke procesbetingelser og tilsætning af en dyr råvare/grundstof i form af magnesium.

3. Teori

3.1 Inddampning

Under en inddampningsproces afdampes vand fra en væske, hvilket danner hhv. et koncentrat og et destillat. Væsken varmes op til kogepunktet hvor faseskift sker fra væske til gas. En væskes kogepunkt afhænger af en række forskellige parametre herunder f.eks. tryk og temperatur.

Ved at arbejde med forskellige tryk og temperaturer, kan kogepunktet for en væske flyttes. Ved lavere tryk findes væskens kogepunkt således ved en lavere temperatur. Dette indebærer, at man kan flytte kogepunktet for vand fra de normale 100 °C ved atmosfærisk tryk til en lavere temperatur ved at mindske trykket. Den specifikke fordampningsenergi, den energi som kræves for et faseskift fra vand til damp, skal stadigvæk tilføres uanset hvilket tryk inddampningsprocessen køres ved. Den specifikke fordampningsenergi for vand er 2,26 MJ/kg vand ved 100 °C (Andersen, 1965) og stiger med faldende temperatur.

I en vakuuminddamper fortrænges luft ud af inddamperen vha. en vakuumpumpe. Undertrykket i inddamperen gør, at væsken kan fordampes ved en lavere temperatur, end under normalt atmosfærisk tryk. Fordelene ved en vakuuminddamper, er derfor bl.a. at processen kan drives med ekstern varmekilde med lavere varmekonsum og at procesforholdene i inddamperen bliver mindre aggressive.

I løbet af inddampningsprocessen koncentrerer ikke flygtige stoffer op i koncentratet mens flygtige stoffer forlader anlægget med destillatet. Under vakuuminddampning vil enkelte fraktioner af stofferne forlade inddamperen med luften der køres ud af vakuumpumpen (Dahlberg, 2010).

Opløseligheden af et stof i en væske ændrer sig efter temperatur og koncentration. Saltes opløselighed mindskes med stigende temperatur (UF, 1971). Med høje stofkoncentrationer og høj temperatur kan mætningsgraden dermed hurtigt nås. Teoretisk er det muligt, at drive inddampningsprocessen så langt, at salte begynder at krystalliseres (Dahlberg, 2010).

Hvis koncentratet bliver overmættet af et stof kan udfældninger ske i hele væsken. Afhængigt af mængden, partikelstørrelsen og driften af selve inddamperen kan disse udfældninger holdes i suspension i koncentratet. Hvis det ikke er muligt at holde udfældningerne i suspension kan konsekvensen være belægninger i inddamperen eller at inddamperen fyldes med udfældninger. Hvis det ønskes at udfældningerne begrænses, kan dette ske ved syredosering til koncentratet (Dahlberg, 2010).

3.2 Mineralske stoffer

Spildevand indeholder flere mineralske stoffer der for størstedelens vedkommende kan henledes til ”råvandets” normale indhold af mineraler (vandets hårdhed) og fra kemikalier, f.eks. blødgørere.

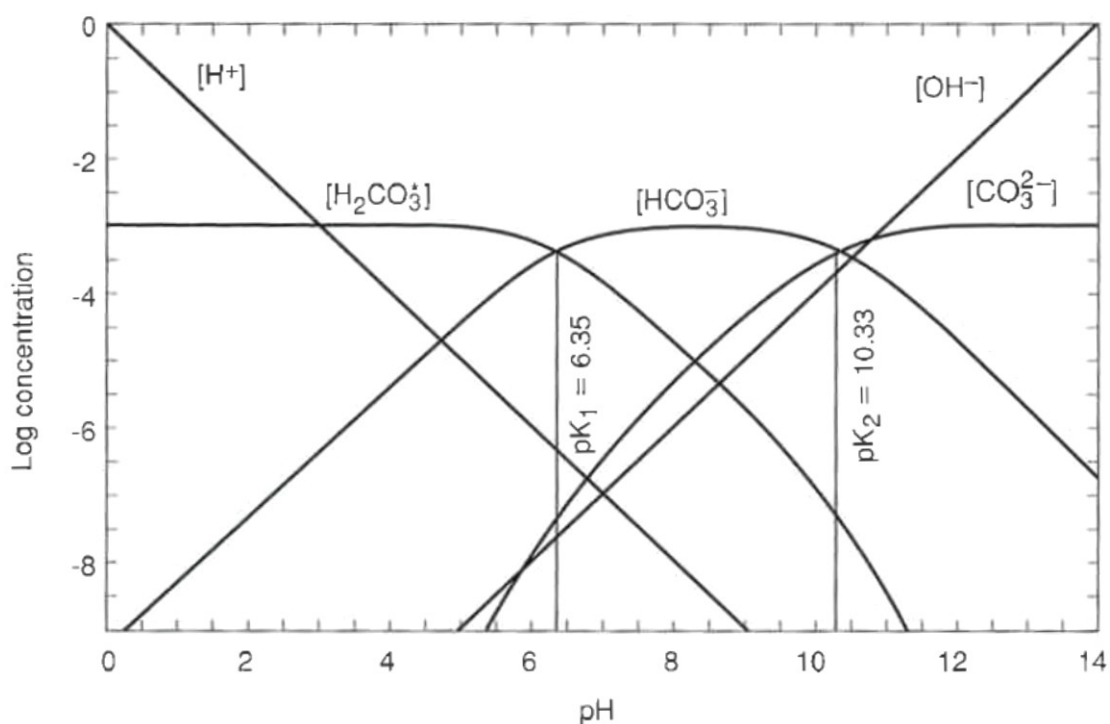
De mest almindelige mineraler i spildevand er calcium og karbonater. Calcium binder gerne til ioner i vand og danner produkter som kan være mere eller mindre opløselige. Calciumkarbonat er et af de mindst opløselige stoffer som forventes at findes i spildevand (UF, 1971).

Karbonaterne udgør vandets pH buffer, foruden en række andre stoffer som også kan agere som buffer (UF, 1971).

Karbonaterne er i ligevægt med det opløste kuldioxid i vandfasen.



Ligevægten mellem de forskellige karbonater er stærkt afhængigt af pH i vandet. Denne ligevægt kan ses i figuren nedenfor.



Figur 1 Ligevægt mellem de forskellige karbonatstoffer afhængigt af pH i vandfasen (Metcalf&Eddy, 2004)

Det er primært karbonationen, CO_3^{2-} , der udfælder, f.eks. med calcium, på grund af sin lave opløselighed ved kogning.

Under kogning af rejktvand forlader kuldioxid væskefasen. Hydrogencarbonat (HCO_3^-) bliver også ustabil ved kogepunktet (UF, 1971). Dette betyder, at pH kontrol af karbonatsystemet har en mindre betydning for kontrol af calciumkarbonatudfældninger. Den kemiske ligning kan beskrives med (4).



Den eneste mulighed for helt at forhindre calciumkarbonatudfældninger er derfor at pH justere vandet før inddampning, således karbonatbalancen hælder mod H_2CO_3 . Derefter strippes kuldioxiden fra vandet, hvilket får kulsyre (H_2CO_3) koncentrationen til at mindskes, jævnfør ligning (1).

Hvis fosfater genfindes i væsken kan en fosforholdig calciumudfældning dannes under inddampningsprocessen. Den mest almindelige calciumfosfatudfældning i renseanlæg er hydroxylapatit, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ hvis dannelse kan beskrives med ligning (5)



Foruden calciumudfældninger kan flere andre mineralsalte udfældes under en inddampningsproces, f.eks. magnesiumudfældninger som struvit (NH_4MgPO_4).

3.3 Hygiejnisering

Spildevand indeholder en lang række patogener, herunder bakterier og virus. Spildevandets indhold af patogener reduceres i renseanlæggets renseprocesser, hvorefter patogenerne primært vil findes i slamfraktionen fra renseprocessen. Det kan derfor forventes, at der fortsat efter udrådning af primærslamfraktionen og det biologiske slam fortsat vil være et højt indhold af patogener i rejektivand der stammer fra afvanding af udrådnets slam.

Patogener som bakterier og virus er ikke flygtige, hvilket indebærer, at de vil opkoncentreres under en inddampningsproces (UF, 1971).

Hvor vidt inddampning har en hygiejniserende effekt er ikke tidligere kortlagt, men forventes at være afhængig af driftstemperatur og pH. Slambekendtgørelsen skriver, at de godkender tre teknologier til ”kontrolleret hygiejnisering” af spildevandsslam, hvor ”Behandling i reaktorer, som sikrer en temperatur på mindst 70 grader celsius i minimum 60 minutter” nævnes som en mulighed (BEK nr. 1650 af 13/12/2006 - Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Slambekendtgørelsen) og tilhørende vejledning- Miljøministeriet).

At opkoncentrere spildevand gennem inddampning forløber over en længere periode, hvilket indebærer, at koncentratets opholdstid i inddamperen er betydeligt længere end de 60 minutter som beskrives i slambekendtgørelsen. Det forventes derfor, at inddampningen vil have en hygiejniserende effekt i så fald processen køres med en temperatur i nærheden af de 70 grader.

3.4 Organisk materiale

Spildevand indeholder store mængde organisk materiale som enten tages ud som primærslam, nedbrydes til kuldioxid i renseanlæggets biologiske rensning eller ender som overskudsslam. Flere renseanlæg vælger at behandle overskudsslammængden under anaerob udrådning. På renseanlæg med rådnetank er det forventeligt, at det lettest nedbryderlige organisk stoffer er omsat under den anaerobe udrådning.

Rejektivand der stammer fra afvanding af udrådnets slam forventes primært at indeholde svært nedbrydeligt eller inert organisk materiale. Litteraturen indikerer, at flygtige organiske syrer kan forlade koncentrat hvis inddampningen køres ved et lavt pH (Bonmati, 2003). Det forventes dog, at rejektivandet indeholder ubetydeligt lave koncentrationer af flygtige organiske syrer på renseanlæg med rådnetanke. Det organiske materiale i rejektivand forventes derfor at blive opkoncentreret i koncentratet under inddampningsprocessen.

3.5 Fosfor

Spildevand indeholder betydelige mængder fosfor i partikulær og opløst form. Fosfor kan ikke som kvælstof og organisk materiale omdannes til gas og dermed forlade spildevandet. Dette indebærer, at fosfor kun kan fjernes fra vandet som slam (Metcalf & Eddy, 2004). Fosfor kan enten indbygges i celler og fjernes med det biologiske slam, eller fanges med fældningskemikalier og fjernes som kemisk slam.

Kemisk fosforrensning almindeligvis ved at metalsalte doseres til spildevandet. Disse metalsalte, oftest jern- eller aluminiumsalte, opløses til ioner i vandet. Metalsaltene danner metalkomplekser. Ved kontakt med fosfat, PO_4^{3-} , dannes et metalfosforsalt.



Fosforen er hårdt bundet til metallet men kan delvist blive genopløst hvis metalkomplekset udgøres af jernforbindelser og det kemiske slam oplever længere anaerobe fase, som i en rådnetank, idet jern reduceres til jern(II).

Specielle fosforakkumulerende bakterier med høj fosforoptagelseskapacitet kan kultiveres ved at integrere anaerobe procesforhold i den biologiske spildevandsrensning. Den ekstra mængde fosfor, som disse bakterier optager, er derimod ikke hårdt bundet til cellerne, hvilket indebærer, at fosforen let genopløses under anaerobe forhold og dermed frigives til væskefasen og ved afvanding, rejektvandet.

Fosfor bundet til slammet, både kemisk og biologisk, kan genopløses til vandfasen i slammet i en rådnetank. Afhængigt af vandets hårdhed kan denne genopløste fosfor genudfældes f.eks. med calcium eller magnesium. Rejektvand som stammer fra afvanding af udrådnet spildevandsslam indeholder fosfor som enten er bundet til det partikulære stof i rejektvandet eller som opløst fosfat.

Fosfor er ikke et flygtigt stof og forventes derfor ikke til at kunne fordampes under inddampningsprocessen (Bonmati, 2003). Al fosfor forventes derfor at blive opkoncentreret i koncentratet i under en inddampningsproces.

3.6 Kvælstof

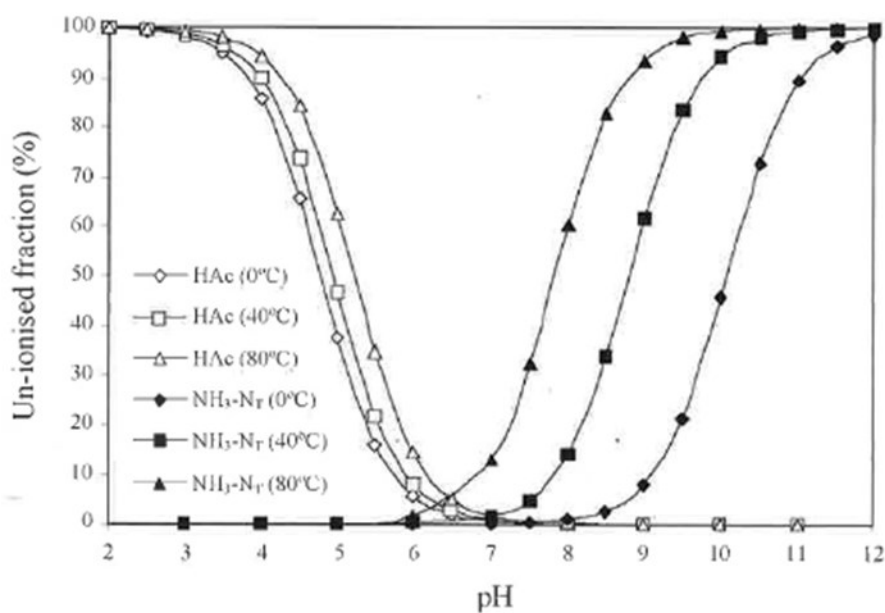
Kommunalt spildevand indeholder store mængder kvælstof som ønskes fjernet før udløb. Kvælstof kan enten fjernes biologisk til nitrogengas eller indbygges i den biologiske slammasse.

I en rådnetank nedbrydes den biologiske slammasse og kvælstof frigives igen til vandfasen. Det frie kvælstof findes primært som ammoniak gas eller som ammonium ioner, som findes i ligevægt med hinanden (Metcalf & Eddy, 2004).



Ammoniak er flygtigt og vil derfor potentielt forlade rejektvandet under en fordampningsproces. Hvis det ønskes at opkoncentrere kvælstof i koncentratet er det derfor nødvendigt at holde ligevægten mod ammonium, som ikke er flygtigt. Flere parametre er relevante at kontrollere såfremt ammoniakafgangen skal begrænses, herunder temperatur, pH, tryk og ammoniumkoncentrationen (UF, 1971).

Den parameter, som har størst indflydelse på ligevægten er pH. Ved at styre pH i væsken kan ligevægten mellem ammoniak og ammonium kontrolleres. Ligevægtens afhængighed af temperatur og pH præsenteres i figuren nedenfor.



Figur 2. Ligevægt mellem ammoniak og ammonium afhængigt af temperatur og pH. Figuren viser også ligevægten mellem ioniseret og ikke ioniseret eddikesyre afhængigt af temperatur og pH. (Bonmati, 2003).

Som det ses af Figur 2 er det nødvendigt at holde pH på ca. 6 for en næsten total ionisering af ammoniakken ved 80°C. Ioniseringen vil stige med faldende temperatur. Da inddampningsprocessen forløber ved ca. 70°C skal pH justeres til 6 for at holde kvælstof på ammoniumform i konzentratet. I et studie fra University of Florida (1971) fandt de, at der ved vakuuminddampning mistes mindre mængder ammoniak fra anlægget sammenlignet med inddampning ved atmosfærisk tryk.

4. Screeningsforsøg

4.1 Formål

Formålet med gennemførelse af screeningsforsøget var, at få undersøgt muligheden for anvendelse af inddampning, som teknologi til genvinding af fosfor og kvælstof fra rektvand, der stammer fra afvanding af udrådnit slam på renseanlæg. I forsøget blev det undersøgt, om inddampningen af rektvandet ville lede til svære udfældninger eller belægninger i inddamperen, eller lignende ikke forudsatte effekter. Derudover var formålet med forsøget at gennemføre en forløbelig undersøgelse af, hvordan næringssaltene og andre stoffer fordeles mellem destillat og koncentrat.

4.2 Forsøgsopstilling

60 liter rektvand fra Renseanlæg Avedøre - BIOFOS blev sendt til VAPOTEC i Sverige for at blive inddampet i en laboratorieskalainddamper. Initialt filtreres rektvandet gennem en 40 og en 20 µm filtredug hvorefter 25 liter filtreret rektvand aftappedes. Henover to uger blev følgende 2 inddampningsforsøg gennemført:

Forsøg 1 – Her blev pH initialt sænket til lidt under 6 med saltsyre. pH blev ikke justeret mere under forsøget.

Forsøg 2 – Her blev pH initialt sænket til under 6 med saltsyre. pH blev løbende korigeret under inddampningsforløbet til lidt under 6 ved tilsætning af saltsyre. Mere information om inddampningsforsøgene og de forskellige observationer findes i de to separate testrapporter, se Bilag 1.

4.3 Resultater

Det viste sig vanskeligt at foretage entydige konklusioner på basis af filtreringsforsøgene. De forskellige analyseresultater varierer så kraftigt at nogle reduktionsgrader egentligt ikke kunne bestemmes. Forsøgene indikerer at, 20 µm filtret giver en højere grad af SS reduktion og metaller sammenlignet med 40 µm filtret. Desuden indikerer resultaterne, at metallerne hovedsagelig forefindes på suspenderet form eller adsorberet på meget små partikler.

Forsøg 1

Den initiale volumen på 25 liter blev ved inddampning reduceret til et koncentrat på ca. 1 liter, dvs. en opkoncentrering på ca. 20.

Resultatet fra analyserne på destillaterne indikerer en god separering af BOD, COD, P-tot og i princippet alle de undersøgte metaller. Disse bør derved i sin helhed findes i koncentratet. Dog indikerede resultaterne en lavere opkoncentrering end de forventede 20, vurderet ud fra stoffkoncentrationerne. Dette vurderes at kunne tilskrives spild eller fejlhåndtering af prøver eller analyse unøjagtighed. I forsøg 1 frigives ammoniakken under inddampningsforsøget og findes således i destillatet.

Forsøg 2

Initialvolumen var 25 liter, tilsvarende forsøg 1, men rektvandet var nemmere at inddampe. Det var muligt at inddampe til et restvolumen på ca. 0,5 liter. Opkoncentreringen bliver derved ca. 50 gange. Igen

indikerer resultaterne fra forsøget at koncentrationstigningen ikke er i overensstemmelse med den forventede baseret på initial- og restvolumen efter inddampning.

Gennem kontinuerlig pH regulering henover forsøget holdes pH under 7 i inddamperen.

4.4 Delkonklusion

De indledende screeningsforsøg indikerer at stoffer adskilles ved inddampning og at det gennem pH regulering i inddamperen er muligt at kontrollere om kvælstoffractionen skal frigives til destillatet som ammoniak eller tilbageholdes i koncentratet som ammonium gennem fastholdelse af lavere pH.

5. Pilotforsøg

5.1 Formål

Formålet med gennemførelse af pilotforsøget var at få undersøgt muligheden for anvendelse af inddampning som teknologi til genvinding af fosfor og kvælstof fra rejeftvand, der stammer fra afvanding af udrådnat slam på renseanlæg, i pilotskala. Det er essentielt at få kortlagt fordelingen af næringssaltene mellem destillat og koncentrat samt at undersøge om begge stoffer kan tilbageholdes og opkoncentreres i koncentratet. Sammensætningen af produktet er efterfølgende, foruden indholdet af næringssalte, undersøgt med hensyn til indholdet af tungmetaller og hygiejniseringsgrad. En delfraktion af produktet fra pilotforsøgene er anvendt til pottforsøg for at vurdere produktets gødningspotentialer. Pottforsøg er udført på Københavns Universitet og resultaterne kan ses i Kapitel 6.

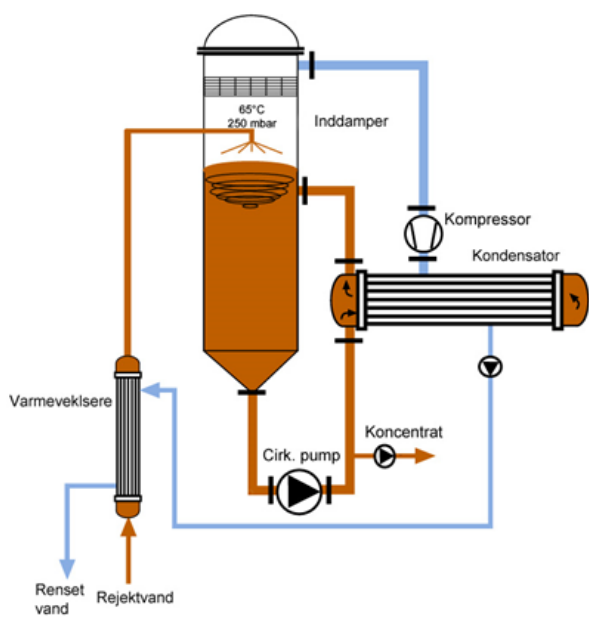
Pilotforsøget havde endvidere til formål, at undersøge indflydelse af procesforholdene temperatur og pH samt sammensætningen af det indkommende rejeftvand på funktionen af teknologien og kvalitet på koncentratet. Øvrige påvirkninger i form af belægninger og andre driftsforstyrrelser under forsøgsperioden blev ligeledes kortlagt.

Pilotforsøget blev udført på BIOFOS renseanlæg Avedøre i perioden fra september 2014 til februar 2015. Rejeftvandet stammer fra afvanding af udrådnat primær og sekundært slam fra renseanlægget. Renseanlæg Avedøre har en kapacitet til rensning af spildvand i størrelsesorden 320.000 PE.

5.2 Opbygning af pilotanlægget

Det anvendte pilotanlæg er leveret af den svenske virksomhed VAPOTEC AB og er af typen VAPOTEC 2 vakuuminddampningsanlæg. Fordelen med denne type inddamper, er at den kun kræver ekstern energi i form af el til opvarmning og pumpning.

Selve pilotanlægget består af en reaktor, hvortil rejeftvandet ledes og opvarmes til den ønskede temperatur. Inddampningsprocessen foregår kontinuerligt og koncentrerer de ikke flygtige stoffer i rejeftvandet til et koncentrat, mens damp og flygtige stoffer forlader anlægget, som et destillat eller bliver ventileret ud gennem vakuumpumpen. Pilotanlægget er designet med varmegenvinding ved kondensering af damp til destillat mod recirkuleret koncentrat og med en varmeveksler mellem udpumpet destillat og indkommende rejeftvand. Et simplificeret flowskema af vakuuminddampningsprocessen er tegnet nedenfor sammen med et billede af det anvendte pilotanlæg.





Figur 3 Skitse af vakuuminddampningsproces ved Vapotec samt foto af det anvendte pilotanlæg ved BIOFOS.

Pilotanlægget er opbygget af følgende hovedkomponenter:

- Trykforøgende pumpe (kompressor)
- Kondensator
- Cirkulationspumpe
- Vakuumpumpe
- Fordampningsreaktor

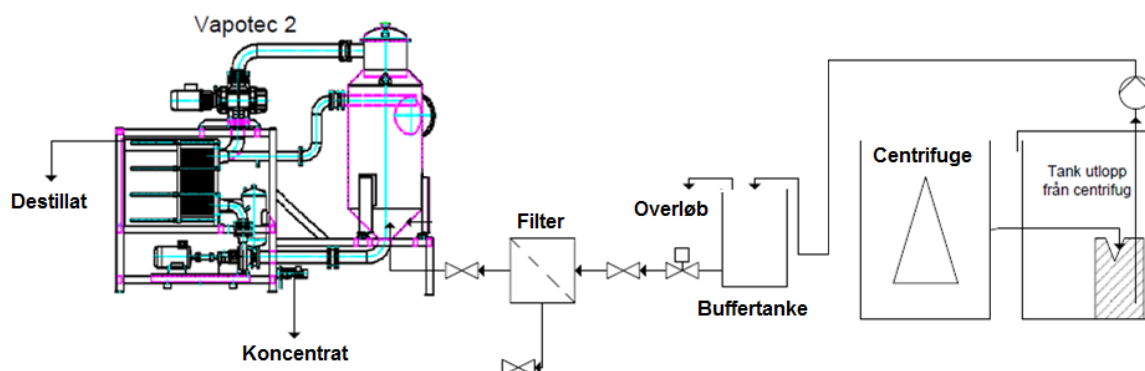
Anlægget fungerer ved at varme tilføres koncentratet i kondensatoren ved høj gennemstrømningshastighed. Efter kondensatoren vil den opvarmede væske strømme til inddamperen hvor inddampningen vil foregå. Dette betyder at inddampningen vil foregå separat fra selve opvarmningen. Damp pumpes under temperaturstigning til kondensatoren hvor det vil kondensere og vil overføre sin varmeenergi til koncentratet som cirkulerer gennem kondensatoren. Koncentratet vil fungere som kølemedie i kondensatoren og tilføres derfor varme. Dette betyder at størstedelen af den energi som vil blive forbrugt ved inddampningsprocessen returneres til koncentratet i kondensatoren. Det anvendte pilotanlæg har en kapacitet på ca. 40 – 80 l/h rejektivand og behandler derfor en delstrøm af den samlede rejektivandsmængde på Avedøre Renseanlæg.

5.3 Forsøgsopstilling

Pilotforsøgene blev udført i centrifugehallen på forbrændingsanlægget på Renseanlæg Avedøre. Rejektivand fra en af de to centrifuger blev kontinuerligt pumpet til en 1 m³ buffertank. I perioder, hvor rejektivand ikke blev suget ind til inddamperen, blev rejektivandet ledt i et overløb fra buffertanken. Buffertanken blev ikke omrørt, hvilket indebærer, at suspenderet stof i rejektivandet fra centrifugen sedimenteredes i buffertanken før det blev suget ind til inddamperen. De interne indløbsanalyser blev udtaget fra overløbet fra buffertanken og forventes derfor have et lavere partikulært indhold end rejektivandet direkte fra

centrifugerne. Tilsvarende forventes der i et fuldsalanlæg at være behov for en partikelseparering før inddampning. Buffertanken blev tømt ned og rengjort mellem hver forsøgsrunde.

Et 25 µm filter anvendes under alle forsøgene til filtrering af rejeftvand efter buffertanken. Filtret blev skiftet mellem hver forsøgsrunde. Forsøgsopsætningen for forsøgsrunde 1-3 er præsenteret i figuren nedenfor.



Figur 4 Forsøgsopsætning i forsøgsrunde 1-3

I forsøgsrunde 4.0 og 4.1 blev foretaget en pH-justering i inddamperen reguleret ved at dosere 30 % saltsyre som blevet fortyndet til 5 % endelig koncentration. Syredoseringen skete via en recirkulationsledning. pH måltes på samme ledning før doseringspunktet.

5.4 Forsøgsplan

Pilotforsøgene blev opdelt i fire forsøgsrunder:

- Forsøgsrunde 1: Indkøring af pilotanlæg med rent vand
- Forsøgsrunde 2: Test af pilotanlæg med rejeftvand
- Forsøgsrunde 3: Forsøg med rejeftvand uden pH justering
- Forsøgsrunde 4.0: Test med rejeftvand med pH justering
- Forsøgsrunde 4.1: Forsøg med rejeftvand med pH justering

Forsøgsrunde 1 og 2 havde til formål at justere forsøgsmetodikken inden forsøgsrunde 3. Det samme var gældende for forsøgsrunde 4.0, som er anvendt til justering af forsøgsmetodikken inden forsøgsrunde 4.1 gennemførtes.

Varigheden af hver forsøgsrunde har været ca. 1 uge, men grundet diverse praktiske og tekniske årsager varierede forsøgslængden mellem de forskellige forsøg. Forsøgene gennemførtes kun i perioder med personale på anlægget.

Tabel 1: Tidsskema for forsøgene.

Test	Dato i 2014
Screeningsforsøg	30. apr.
Forsøg 1	15. – 18. sep.
Forsøg 2 + 3	30. sep. – 10. okt

5.5 Sammensætning af rejektivand

Forsøgsopstillingen var opsat på en sådan måde, at flowproportionel prøvetagning på rejektivand og destillat ikke var muligt. Dette indebærer, at rejektivandets og destillatets sammensætning blev målt på stikprøver, hvilket gav en større usikkerhed på resultaterne. For at få et billede af, hvordan rejektivandsbelastningen på anlægget varierede henover forsøgene præsenteres samtlige gennemførte rejektivandsanalyser i tabel 2.

Bemærk; det forklarede rejektivand passerer også igennem et 25 µm filter før det kommer ind i inddamperen. Det forventes derfor, at den faktiske partikulære belastning på pilotanlægget er betydeligt lavere end hvad som præsenteres i tabellen nedenfor, hvor analyserne er foretaget på rejektivand der ikke er forklaret.

Tabel 2: Sammensætning af rejektivand et på renseanlæg Avedøre, (før buffertank) periode 2014

Rejektivand	Testforsøg 1	Testforsøg 2	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4	Forsøg 4.1	Middel værdi	Enhed
Rå prøve								
pH	7,5	7,5	7,7	7,9	8	7,7	7,7	
COD				320	461	460	414	mg/l
SS			93	270	310	250	231	mg/l
TN				350	441	440	410	mg/l
TP	82,4	60,8		81	83,1	87	79	mg/l
Filtreret prøve								
COD			126		138		132	mg/l
NH ₄ -N	347,2	476	372,5	360	418,5	410	397	mg/l
PO ₄ -P	26,4	42,8	57	68	63	85	57	mg/l

Tabel 3 Vurdering af standardkoncentrationer for normalt og tyndt rejektivand fra udrådnat slam.

Rejektivandstype	NH ₄ -N	PO ₄ -P	SS	Enhed
Normalt ¹	800	200	1000	mg/l
Tyndt	300	80	1000	mg/l

¹ 'Syntese af diverse analyser på BIOFOS 'renseanlæg'

Baseret på analyseresultaterne præsenterede i tabel 2 og "standardværdierne" i tabel 3 vurderes det at rejektivand på BIOFOS renseanlæg Avedøre indeholder lave koncentrationer af de analyserede parametre og dermed kan betegnes som tyndt.

Kvælstoffet i rejektivand findes primært på opløst form, ~96 % NH₄-N af TN. For fosfor udgør den opløste form (PO₄-P) ca. 72 % af TP. De resterende 28 % vurderes være partikulært bundet fosfor eller kemisk bundet fosfat sammen med metaller og salte. Som det fremgår af tabellen varierer indholdet af

fosfor fra 26,4 til 85 mg PO₄-P/l. Ses der bort fra analyseresultatet på 26,4 stiger den gennemsnitlige koncentration til 63 mg/l.

5.6 Procesforhold

I tabel 4 nedenfor præsenteres driftsdata for de fire forsøg med inddampning af rejktvand.

Tabel 4. Sammenligning af procesforhold mellem de udførte forsøg.

	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4	Forsøg 4.1
Driftstid	67 t 15 min.	71 t 55 min.	64 t 50 min	70 t 7 min.
Tryk (mbar)	~230	~240	~170	~160
Temp. (°C)	~64	~64	~57	~56
Syreforbrug	-	-	~12 l	Ikke måleligt
Rejktvand (liter)	4.066	4.578	4.842	5.536
Destillat (liter)	3.926	4.438	4.702	5.396
Koncentrat (liter) *	~140	~140	~140	~140
Opkoncentrering (%)	~3,4	~3,1	~2,9	~2,5

Inddamperen regulerer automatisk trykket som funktion af temperaturen for at finde det specifikke kogepunkt ved den gældende temperatur. Temperatur og tryk har ikke ligget stabilt henover forsøgene. De noterede tryk og temperaturer i tabel 4 er derfor det vurderede gennemsnitstryk og temperatur gennem forsøgene.

Af praktiske og tekniske årsager var det ikke muligt at køre alle forsøg over den samme tidperiode. Den opnåede opkoncentrering ligger dog omkring 3 % i alle forsøgene.

5.7 Prøvetagnings- og analyseprogram

For hver gennemført forsøgsrunde (2-4) blev udtaget repræsentative prøver fra følgende prøvetagningspunkter:

1. Rejktvand (**R1**): Efter centrifuge
2. Rejktvand (**R2**): Efter buffertank
3. Koncentrat (**K**): Det koncentrerede produkt
4. Destillat (**D**): Bi-produkt

Alle prøver blev udtaget som stikprøver. Det forventes dog, at rejktvandets sammensætning er relativt homogent eftersom det stammer fra afvandet slam som er homogeniseret gennem en lang opholdstid i rådnetankene og fordi rejktvandet udlignes i buffertanken. Ligeledes er koncentratet et produkt af en lang opholdstid i inddamperen. Koncentratets sammensætning vil forandres over tid eftersom stofferne vil langsomt koncentreres henover de semi-kontinuerlige forsøgene. Det forventes dog ikke, at koncentratets sammensætning varierer meget indenfor en kort tidsperiode. Destillatets sammensætning er dog en produkt af inddampningsprocessen og forventes derfor at kunne variere indenfor store intervaller henover forsøget.

De forskellige strømme blev alle analyserede for almindelige spildevandsparametre, dvs. organisk indhold, suspenderet materiale og næringsstoffer. Derudover blev der analyseret for en række andre parametre i forsøg 3 og 4.1. Disse parametre var udvalgt med baggrund i dansk lovgivning for anvendelse af "spildevandsslam" til jordbrugsformål og stiller således krav til at indholdet af en række tungmetaller og en

række miljøfremmede stoffer skal være kendt og overholdt før anvendelse til jordbrugsformål kan godkendes. Analyseparametrene omfatter følgende:

1. SPV: Spildevandsparametre
2. TM: Tungmetaller
3. MFS: Miljøfremmede stoffer
4. HY: Hygiejniseringsparametre

De almindelige spildevandsparametre (pkt. 1) blev udført internt af BIOFOS når der ikke blev gennemført en fuld analysepakke. De øvrige analyseparametre anført under pkt. 2, 3 og 4 (tungmetaller, miljøfremmede stoffer og hygiejniseringsparametre) blev analyseret ved eksternt laboratorium (Eurofins). Hertil inkluderes også de samme spildevandsparametre som der analyseres ved BIOFOS. De anvendte analysemetoder fremgår af bilag 2

5.8 Resultater uden pH justering

5.8.1 Forsøg 2 – Test

I forsøg 2 blev de tre fraktioner, rejeckt vand, koncentrat og destillat, analyseret på BIOFOS laboratorium på Lynetten. Prøverne blev udtaget som stikprøver ved afslutningen af forsøget d. 3. oktober. Resultatet af de udførte analyser fremgår af tabel 5 herunder.

Tabel 5. BIOFOS analyseresultater fra forsøg 2.

	Rejeckt vand		Koncentrat		Destillat	
Rå prøve						
pH	7,7		9,3		9,4	
	mg/l	kg	mg/l	kg	mg/l	kg
SS	93	0,38	11.978	17	13,25	0,06
Filtreret prøve						
	mg/l	kg	mg/l	kg	mg/l	kg
COD	126	0,51	2561	3,6	7,97	0,04
NH ₄ -N	372,5	1,5	33,3	0,005	369	1,65
PO ₄ -P	57	0,23	15,2	0,002	0,05	0,0002

Analyseresultaterne præsenteret i tabel 5 viste, at der ikke skete en opkoncentrering af ortofosfat i koncentratet, men der kan være sket en udfældning af fosfor koncentratet. Der blev derfor gennemført en undersøgelse af filterkagen fra det filtrerede koncentrat. Resultaterne fra denne analyse er præsenteret i tabel 6 herunder.

Tabel 6. BIOFOS analyseresultater fra forsøg 2. Filterkage

Bundfald/ filterkagen	Metode (A)*		Metode (B)**	
	mg/l	% i filterkage	mg/l	% af TS i filterkage
pH	7,15		2,61	

COD	59,5	5,5	83,2	5,4
TN	2,08	0,19	3,08	0,20
TP	54,2	5,03	73,7	4,77
NH ₄ -N	0,5	0,046	0,194	0,013
PO ₄ -P	50,9	4,72	72,2	4,68

*Metode (A) 0,1078 g fyldt m. 100 ml demivand, pH=7,15

**Metode (B) 0,1544 g tilsat 5 dråber 5 % HCL og fyldt m. 100 ml demivand

Analyserne præsenteret i tabel 6 viser, at indholdet af fosfor efter opløsning med hhv. demineraliseret vand og ved en tilsætning af saltsyre. Resultatet viser, at fosforen i filterkagen kan genopløses og dermed kan genfindes som ortofosfat.

I forhold til kvælstof viste analyseresultaterne, at ammoniummet i rejeckt vandet blev overført ved inddampningen til destillatet. Analysen af filterkagen viste, at en lille del er bundet kvælstof som udfældes i inddamperen. I modsætning til fosfor er kvælstoffet ikke blevet genopløst.

5.8.2 Forsøg 3 – Forsøg uden pH justering

I forsøg 3 blev de tre fraktioner, rejeckt vand, koncentrat og destillat, igen analyseret ved BIOFOS laboratorium på renseanlæg Lynetten. Derudover er prøver fra hver fraktion analyseret af Eurofins laboratorium for indholdet af tungmetaller, miljøfremmende stoffer og hygiejniseringsparametre samt almindelige spildevandsparametre.

Det skal noteres at, rejeckt vandsprøven analyseret ved BIOFOS er udtaget direkte efter centrifugen, mens rejeckt vandsprøven analyseret ved Eurofins er udtaget i overløbet fra indløbsbuffertanken og repræsenterer derfor indløbsbelastningen på inddampningsanlægget før filtret. Denne forskel i prøvetagningspunkt influerer på analyseresultaterne udført på de to råprøver.

Stikprøven af rejeckt vand har derfor et højere indhold af især COD og suspenderet stof end prøven sendt til Eurofins.

Tabel 7. BIOFOS Analyseresultater forsøg 3, rejeckt vand

	Rejeckt vand		Koncentrat		Destillat	
Rå prøve						
pH	7,67		9,27		8,04	
	mg/l	kg	mg/l	kg	mg/l	kg
COD	727	3,33	6.124	0,86	14,3	0,06
SS	582	2,66	15.897	2,23	72,2	0,32
TN	382,5	1,75	230	0,03	-	
TP	96	0,44	1.920	0,27	-	
Filtreret prøve						
	mg/l		mg/l		mg/l	
COD	131	0,60	2.922	0,41	7,11	0,03
NH ₄ -N	400	1,83	31,9	0,004	2.485	11
PO ₄ -P	69,5	0,32	25	0,004	<0,002	-

Analyseresultaterne tyder igen på, at det sket en kraftig udfældning af fosfor i inddamperen.

I forsøg 3 er der ligeledes foretaget en undersøgelse af filterkagen efter filtrering af koncentratet og resultaterne heraf kan ses i tabel 8.

Tabel 8. BIOFOS Analyseresultater forsøg 3, bundfald/filterkage.

Bundfald/filterkagen	Metode (B)*	
	mg/l	% af TS i filterkage
pH	3,1	
COD	14,2	13,9
TN	0,5	0,50
TP	11,6	11,41
NH ₄ -N	0,03	0,029
PO ₄ -P	11,3	11,08

*0,0102 g tilsat 5 dråber 5 % HCL og fyldt m. 100 ml demivand

Analysen af filterkagen med den anvendte metode indikerer et forhold mellem ortofosfat og TP på 97 %. Dette indikerer, at fosforen bliver genopløst ved tilsætning af demineraliseret vand med 5 % HCL. I forhold til kvælstof, så viser analyseresultaterne i tabel 7 igen, at ammoniummet i rejeckt vandet primært dampes af ved inddampningen og forlader anlægget med destillatet. Det kvælstof, som kan måles i koncentratet består primært af bundet kvælstof, kun ca. 2 % opløst ammonium. Analyserne af filterkagen viser også, at kun ca. 6 % af kvælstoffet er opløst efter tilsætning af demineraliseret vand og 5 % HCL.

Filterkagen blev også analyseret ved FORCE Technology. FORCE gennemførte en Scanning Electron Microscopy (SEM) ved hjælp af Energy Dispersive X-ray analyses (EDX) efter pyrolyse af bundfaldet. EDX er en semi-quantitativ analysemetode som analyserer stoffer med atomnummer >5. Derudover blev en kvalitativ røntgendiffraktions undersøgelse (XRD) gennemført for at bestemme hvilke krystalstrukturer der er tilstede. FORCE fulde analyserapport er vedhæftet som bilag 3 til denne rapport.

EDX analysen viste et fosforindhold i bundfaldet på ca. 11-12 % af TS. Andre primære stoffer i bundfaldet er calcium, ilt, silicium og magnesium. Materialet er amorft, hvilket indebærer, at der ikke er nogen veldefinerede krystaller i bundfaldet, hvilket gør det kompliceret at bestemme indholdet. Det vurderes dog primært at bestå af oxider og karbonater, herunder måske hydroxylapatit.

I nedenstående tabel 9 er vist analyseresultaterne fra Eurofins analyser. Resultaterne for råprøven viser som forventeligt et lavere indhold af samtlige parametre målt på rejeckt vandet sammenlignet med resultaterne fra tabel 7. Dette er helt i overensstemmelse med det forventede, da stikprøven af rejeckt vand er udtaget på prøvetagningsstedet overløb fra buffertanken.

Tabel 9. Eurofins Analyseresultater forsøg 3 - rejeckt vandsprøve.

	Rejeckt vand	Koncentrat
	mg/l	mg/l
Rå prøve		
pH	7,9	8,9
COD	320	3800
SS	270	5200

TN	350	160
TP	81	590
Filtreret prøve		
	mg/l	mg/l
NH ₄ -N	360	45
PO ₄ -P	68	40

I nedenstående tabel 10 kan analyseresultaterne fra Eurofins analyse for tungmetaller i rejeftvand og koncentrat findes. Analyseresultaterne på koncentratet er også blevet sammenlignet med slambekendtgørelsens grænseværdier for metaller ved udbringning af slam på landbrugsjord.

Tabel 10. Eurofins Analyseresultater i forsøg 3 - tungmetaller

Komponent	Rejeftvand	Koncentrat		Grænseværdi		Grænseværdi
	µg/l	µg/l	mg/kg SS	mg/kg SS	mg/kg TP	mg/kg TP
Bly	3,7	13	2,5	120	22	10.000
Cadmium	0,13	0,36	0,7	0,8	0,6	100
Chrom	1,8	14	2,7	100		
Kobber	25	82	15,8	1.000		
Kviksølv	0,12	0,65	0,125	0,8	1,1	200
Nikkel	12	220	42,3	30	372,9	2.500
Zink	77	320	61,5	4.000		

Resultaterne viser, at samtlige grænseværdier overholdes på enten tørstof og/eller fosfor.

Tabel 11: Eurofins Analyser på miljøfremmede stoffer fra forsøg 3

Komponent	Rejektvand	Destillat	Koncentrat		Grænseværdi
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/kg SS	mg/kg SS
LAS	380	< 100	660	127	1.300
Acenaphthen	< 0,01	0,018	<0,01		
Fluoren	< 0,01	0,025	<0,01		
Phenanthren	< 0,01	0,038	<0,01		
Fluoranthren	< 0,01	0,029	0,017		
Pyren	< 0,01	0,085	<0,02		
Benzo(b+j+k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01	0,044		
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01	0,018		
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,01	< 0,01	0,012		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01	0,037		
Sum af PAH'er	-	0,2	0,13	0,025	3
Diethylhexylphthalat (DEHP)	0,41	0,32	8,4	1,6	50
Nonylphenoler	<0,05	0,22	0,64		
Nonylphenolmonoethoxylater	<0,05	0,09	0,72		
Nonylphenoldiethoxylater	< 0,1	< 0,1	0,31		
Sum af Nonylphenol+ethoxylater	-	0,31	1,7	0,35	10

Forholdet mellem tungmetaller, miljøfremmede stoffer og tørstof samt fosfor er beregnet ud fra Eurofins analyse af suspenderet stof på koncentratet, hvilket viste et betydeligt lavere indhold end hvad BIOFOS analyserede. Dette betyder, at forholdet bliver meget højere end hvis BIOFOS målte SS koncentration anvendes.

Tabel 12 viser, resultaterne fra analyse af hygiejniseringsparametre.

Tabel 12 Eurofins analyser på hygiejniseringsparametre i forsøg 3.

Komponent	Resultat	Enhed	Grænseværdi	Enhed
Escherichia coli	< 1	MPN/100 ml	<100	CFU/g
Intestinale enterokokker*	< 100	CFU/100 ml	<100	CFU/g
Salmonella	Ej påvist	/100 ml	Ej påvist	

*Detektionsgrænsen på enterokokker er hævet fra <1 CFU/100 ml til <100 cfu/100 ml grundet prøvens beskaffenhed.

De præsenterede grænseværdier er tilsvarende de grænseværdier som nævnes i slambekendtgørelsen for kontrolleret hygiejnisering af spildevandsslam. Da koncentratet er flydende og en ny type ressourcefraktion fra spildevandsrens anlæg, er det vanskeligt at lave en direkte sammenligning af analyseresultaterne med slambekendtgørelsens grænseværdier for spildevandsslam. De nævnte grænseværdier kan således ikke forventes at være gældende for et inddampet produkt, men vurderes at være retningsgivende for eventuelle krav til det inddampede produkt.

5.9 Resultater med pH justering

5.9.1 Forsøg 4 – test

I forsøg 4 blev de tre fraktioner, rejeftvand, koncentrat og destillat, analyseret ved BIOFOS laboratorium på Renseanlæg Lynetten. Prøverne blev udtaget som stikprøver ved afslutningen af forsøget d. 27. november. Resultater af den udførte analyser fremgår af tabel 13 herunder.

Tabel 13. BIOFOS analyseresultater fra forsøg 4.

	Rejeftvand		Koncentrat		Destillat	
Rå prøve						
pH	8		8		10	
	mg/l	kg	mg/l	kg	mg/l	kg
SS	310	1,50	8.492	1,18	53	0,25
COD	461	2,23	5.050	0,70	10,8	0,05
TN	441	2,13	593	0,08	270	1,27
TP	83	0,40	1.080	0,15	1	0,004
Filtreret prøve						
	mg/l	kg	mg/l	kg	mg/l	g
COD	138	0,67	2.050	0,29	10,2	0,05
NH ₄ -N	419	2,02	372	0,05	277	1,30
PO ₄ -P	63	0,30	15,2	0,002	<0,05	-

	Rejeftvand	Koncentrat	Destillat
Rå prøve			
pH	8	8	10
	mg/l	mg/l	mg/l
SS	310	8.492	53
COD	461	5.050	10,8
TN	441	593	270
TP	83	1.080	1
Filtreret prøve			
	mg/l	mg/l	mg/l
COD	138	2.050	10,2
NH ₄ -N	419	372	277
PO ₄ -P	63	15,2	<0,05

Det var henover forsøget vanskeligt at holde en stabil syredosering. Dette indebar, at den endelige pH i koncentratet blev højere end ønsket. Resultaterne fra testforsøget viste, at koncentratet havde et meget lavt

indhold af ortofosfat i forhold til totalfosfor. Analyseresultaterne præsenteret i tabel 13 viser, at der ikke er sket en opkoncentrering af ortofosfat i koncentratet, hvilket passer sammen med resultatet fra de første to forsøg (forsøg 2 og 3). I forsøg 2 og 3 endte pH i koncentratet på 9,3.

Med en pH værdi på 8 i forsøg 4 blev der opnået end 10x højere ammoniumkoncentration i koncentratet. Grundet den ustabile pH styring kan koncentratets pH værdi have varieret henover koncentratet. I den semi-kontinuerlige inddampningsproces kan det opkoncentrerede ammonium have forladt anlægget med destillatet ved en høj pH i koncentratet.

Undersøgelsen af filterkagen fra det filtrerede koncentrat og resultaterne er præsenteret i tabel 14 herunder.

Tabel 14. BIOFOS analyseresultater fra forsøg 4.

Bundfald/filterkagen		
	mg/l	% af TS i filterkage
pH	2,3	
COD	44,3	31,6
TN	2,0	1,5
TP	15,2	10,8
NH ₄ -N	0,095	0,07
PO ₄ -P	15	10,7

Analyserne præsenteret i tabel 13 viser indholdet af fosfor efter opløsning med saltsyre og demineraliseret vand. Resultatet viser, at fosforen i filterkagen genopløses og kan genfindes som ortofosfat.

5.9.2 Forsøg 4.1 – Forsøg med pH justering

I forsøg 4.1 blev de tre fraktioner, rejktvand, koncentrat og destillat, analyseret ved BIOFOS laboratorium på renseanlæg Lynetten. Derudover er prøver fra hver fraktion analyseret af Eurofins laboratorium for indholdet af tungmetaller, miljøfremmende stoffer og hygiejniseringsparametre samt almindelige spildevandsparametre. Der var stadigvæk problemer med syredoseringen i forsøg 4, men det var dog muligt at nå en lavere pH end i forsøg 4, se tabel 15 herunder.

Tabel 15. BIOFOS Analyseresultater i forsøg 4.1.

	Rejktvand		Koncentrat		Destillat	
Rå prøve						
pH	7,5		7,5		9,2	
	mg/l	Kg	mg/l	kg	mg/l	kg
COD	285	1,22	3.772	0,81	7,6	0,11
SS	221	1,58	5.812	0,53	20,7	0,04
TN	443	2,45	497	0,07	142,5	0,77
TP	110	0,60	880	0,12	<0,05	-
Filtreret prøve						
	mg/l	Kg	mg/l	kg	mg/l	kg
COD	127	0,70	1.680	0,002	7,9	0,04

NH ₄ -N	379,5	2,10	336	0,005	118,5	0,64
PO ₄ -P	76,8	0,43	29	0,004	<0,05	-

Resultaterne viser, at orthofosfat igen udfældes i koncentratet. I forsøg 4.1 er der ligeledes foretaget en undersøgelse af filterkagen efter filtrering af koncentratet og resultaterne heraf kan ses i tabel 16.

Tabel 16 BIOFOS Analyseresultater i forsøg 4.1 – bundfald/filterkagen.

Bundfald/filterkagen		
	mg/l	% i filterkage
pH	8,8	
COD	58,5	29,3
TN	2,5	1,2
TP	26	13
NH ₄ -N	0,19	0,1
PO ₄ -P	25,6	12,8

I nedenstående tabel ses analyseresultaterne fra Eurofins analyse for almindelige spildevandsparametre i rejeftvand og koncentrat.

Tabel 17. Eurofins Analyseresultater i forsøg 4.1.

	Rejeftvand	Koncentrat
	mg/l	mg/l
Rå prøve		
pH	7,7	7,9
COD	460	3700
SS	250	6300
TN	440	580
TP	87	800
Filtreret prøve		
	mg/l	mg/l
NH ₄ -N	410	450
PO ₄ -P	85	42

Resultaterne fra Eurofins viser generelt sammenlignelige værdier for de analyserede parametre som værdierne for BIOFOS. pH værdien i koncentratet er dog højere end analyseret hos BIOFOS.

I nedenstående tabel 18 ses analyseresultaterne fra Eurofins for analyse af tungmetaller i rejektvand og koncentrat. Analyseresultaterne på koncentratet er også blevet sammenlignet med slambekendtgørelsens grænseværdier for metaller ved udbringning af slam på landbrugsjord, hvilket kan ses i tabellen.

Tabel 18. Eurofins Analyseresultater i forsøg 4.1 - Tungmetaller.

Komponent	Rejektvand	Koncentrat		Grænseværdi		Grænseværdi
	µg/l	µg/l	mg/kg SS	mg/kg SS	mg/kg TP	mg/kg TP
Bly	3,4	55	8,7	120	68,8	10.000
Cadmium	0,078	1,2	0,2	0,8	1,5	100
Chrom	<0,5	260	41,3	100		
Kobber	11	240	38,1	1.000		
Kviksølv	0,12	1,2	0,2	0,8	1,5	200
Nikkel	7,7	290	46	30	362,5	2.500
Zink	46	860	136,5	4.000		

Resultaterne viser, at samtlige af slambekendtgørelsens grænseværdier for metaller ved udbringning af slam på landbrugsjord er overholdt på enten tørstof og/eller fosfor, hvilket er tilsvarende resultaterne fra forsøg 3.

Tabel 19. EUROFINS Analyser på miljøfremmede stoffer fra forsøg 4.1.

Komponent	Rejektvand	Destillat	Koncentrat		Grænseværdi
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/kg SS	mg/kg SS
LAS	220	< 100	2000	317,4	1.300
Acenaphthen	0,069	< 0,01	< 0,1		
Fluoren	0,098	0,012	< 0,1		
Phenanthren	0,09	0,015	< 0,1		
Fluoranthren	0,026	< 0,01	< 0,1		
Pyren	0,042	0,018	< 0,1		
Benzo(b+j+k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01	0,14		
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01	< 0,1		
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,01	< 0,01	< 0,1		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01	< 0,1		
Sum af PAH'er	0,32	0,045	0,14	0,022	3
Diethylhexylphthalat (DEHP)	5,6	< 0,1	35	5,6	50
Nonylphenoler	0,52	0,2	0,8		
Nonylphenolmonoethoxylater	0,11	0,05	< 1,5		
Nonylphenoldiethoxylater	< 0,1	< 0,1	< 1		
Sum af Nonylphenol+ethoxylater	0,63	0,25	0,8	0,13	10

Resultaterne viser, at koncentratet overholder spildevandbekendtgørelsens grænseværdier i forhold til miljøfremmende stoffer.

EUROFINS har analyseret for udvalgte parametre indenfor hygiejniserings. Tabel 20 viser, der er målt lave niveauer indenfor relevante hygiejniseringsparametre.

Tabel 20. EUROFINS analyser af hygiejniseringsparametre i forsøg 4.1.

Komponent	Resultat	Enhed	Grænseværdi	Enhed
Escherichia coli	54	MPN/100 ml	<100	CFU/g
Intestinale enterokokker*	1100	CFU/100 ml	<100	CFU/g
Salmonella	Ej påvist	/100 ml	Ej påvist	

De præsenterede grænseværdier er de som angives i slambekendtgørelsen for kontrolleret hygiejnisering af spildevandsslam. Det er vanskeligt, at udføre en direkte sammenligning af analyseresultaterne med slambekendtgørelsens grænseværdier for spildevandsslam, da konzentratet er flydende og ikke i fastform, som slam. Hvis man sammenligner resultaterne fra forsøg 4.1 og forsøg 3 så kan E.Coli og Enterokokker påvises i forsøg 4.1, hvilket de ikke kunne i forsøg 3. De umiddelbare forklaringer til dette kan være, at pH var tæt på neutral, og at temperaturen ikke var høj nok til en effektiv hygiejnisering.

5.9.3 Ekstraforsøg fra Vapotec

Der blev gennemført et ekstraforsøg den 10. - 11. februar 2015 med det Formål at gennemføre et forsøg med fokus på prøveindsamling og stabilisering af pH styring. pH reguleringen blev under ekstraforsøget gennemført ved manuel syredosering, driften af pilotanlægget blev derfor afgrænset til dagtimerne. Hensigten med forsøget var at bibeholde et pH der konstant lå under 7. Forsøget blev midlertidigt præliminært afsluttet pga. brud på en central pumpe, hvorfor forsøget ikke forløb en tilsvarende tidsperiode som i de foregående forsøg.

Data for driften af pilotanlægget er sammenfattet i tabel 21

Tabel 21. Driftsdata for forsøget.

	Forsøg
Driftstid	15 t 30 min
Tryk (mbar)	~ 150-250
Temp. (°C)	~ 56-63,5
Rejektvand (liter)	930
Destillat (liter)*	780
Koncentrat (liter)	150
Koncentrering	16 %

*Destillatmængden er estimeret efter pumpens kapacitet.

For at få et mere præcist billede af rejeckt vandet og destillatet er der under dette forsøg forsøgt udtaget tidsproportionale prøver fra både rejeckt vand og destillat, dvs. 2 x 15 prøver i alt, 1 prøve fra hhv. rejeckt vand og destillat pr. time over forsøget der forløb over 15 timer. Delprøverne fra hver fraktion er samlet til hver sin samleprøve og sendt til analyse hos BIOFOS.

I forsøget blev de tre fraktioner, rejeckt vand, koncentrat og destillat, analyseret på BIOFOS laboratorium på Lynetten. Resultater af de udførte analyser fremgår af tabel 22 herunder.

Tabel 22 BIOFOS analyseresultater fra ekstraforsøget.	Rejektvand		Koncentrat		Destillat	
Rå prøve						

pH	7,7		6,5		9,5	
	mg/l	kg	mg/l	kg	mg/l	
SS	274	0,25	870	0,13	33	0,03
COD	388	0,36	1.177	0,18	24	0,02
TN	483	0,45	1.222	0,18	117	0,09
TP	66	0,06	220	0,03	2	0,002
Filtreret prøve						
	mg/l		mg/l		mg/l	
COD	117	0,11	560	0,08	12,8	0,01
NH ₄ -N	409	0,38	1.056	0,16	111	0,09
PO ₄ -P	48	0,04	125	0,02	0,7	-

Selvom der, under hele forsøget, var en operatør til at sikre driften af anlægget, var det stadigvæk vanskeligt, at holde en stabil syredoseringsstyring. Under hele forsøget lå pH stabilt mellem 6,3-6,5 undtaget et enkelt tilfælde hvor pH steg til ca. 7.

Analyseresultaterne præsenteret i tabel 22 viser, at der sket en lille opkoncentrering af orthofosfat i koncentratet, hvilket ikke er set i de tidligere fire forsøg. Forventningen til ekstraforløbet hvor pH konstant blev holdt på et lavere niveau (Niveau under pH = 7) var, at orthofosfat i mindre grad end i de tidligere forsøg ville fælde ud i koncentratet. Resultaterne præsenteret i tabel 22 viser, at en del fosfor stadigvæk bliver fældet ud, men at ca. 55 % bliver på opløst form.

Ved en næsten konstant pH i intervallet 6,3-6,5 under hele forsøget blev kvælstofkoncentrationen målt til 1.222 mg/l. Det vurderes at selv en kortere periode med øget pH vil have stor effekt på indholdet af ammonium i koncentratet. Det kan derfor være, at den kortere periode med pH på 7 kunne betyde at, en stor mængde ammoniak har forladt koncentratet.

Der er i koncentratet fra ekstraforløbet observeret udfældninger. Derfor gennemførtes en undersøgelse af filterkagen. Resultaterne er præsenteret i tabel 23 herunder.

Tabel 23. BIOFOS analyseresultater fra forsøg 2.

Bundfald/filterkagen		
	mg/l	% i filterkage
pH	7,8	
COD	149	56
TN	6,8	2,5
TP	26,2	9,8
NH ₄ -N	0,2	0,1
PO ₄ -P	23,8	9

Analyserne præsenteret i tabel 23 viser indholdet af stoffer i bundfaldet efter opløsning med saltsyre og demineraliseret vand. Resultatet viser, at fosforen i filterkagen genopløses og kan genfindes som orthofosfat.

Analysen af filterkagen viser, at det kvælstof som udfældes i inddamperen primært findes som bundet kvælstof, i og med at kvælstoffet ikke genopløses efter tilsætning af syre og demineraliseret vand. Der er ikke noget der tyder på at ammonium krystalliseres ved inddampningen, men forbliver på opløst form.

5.10 Delkonklusion - pilotforsøg

Nedenfor vurderes og summeres de opnået resultater af de gennemførte pilotforsøg.

5.10.1 Analyseusikkerhed

Analyserne af destillat er udført på stikprøver, hvilket indebærer, at der er en stor usikkerhed på karakterisering af sammensætningen af denne strøm. Rejektvandet forventes at være blevet delvist udjævnet i rådnetanken og buffertanken. Det forventes også, at analyserne af koncentratet er relativt repræsentative, da koncentreret rejektivand akkumuleres i inddamperen henover forsøgsperioden, hvilket betyder at volumen og koncentrationerne i koncentratet kan bestemmes i slutningen af forsøget. Dette betyder at det ikke har været muligt, ud fra de tilgængelige data, at opstille en fuldstændig massebalance over inddampfingsanlægget.

Det skal nævnes, at der har været en forskel i de målte koncentrationer i de forsøg hvor både interne og eksterne analyser blev udført på samme strømme. I den videre databehandling blev de eksterne analyseresultater anvendt, fordi akkrediterede laboratorier normalt anvendes ved officielle resultatpræsentationer.

5.10.2 Genvinding af næringsstoffer

Resultaterne fra alle forsøgene viste, at fosfor næsten udelukkende kan genfindes i koncentratet, hvilket er forventeligt, da fosfor ikke er flygtigt. Målingerne af ortho-fosfat i koncentratet er generelt lave, hvilket indikerer at fosforen er fældet ud. Analyserne viser imidlertid, at al fosfor i rejektivand ikke kan genfindes i koncentratet. Forskellen mellem mængden af fosfor som kommer ind til anlægget med rejektivand, og den mængde som kan genfindes i koncentratet kan stamme fra analyseusikkerheder, ikke repræsentative prøvetagning eller at en stor del af fosforen forbliver i reaktoren, som belægning indvendigt på vægge og i varmeveksleren.

Udfældninger i koncentratet kan detekteres visuelt efter udtag, hvor prøverne har henstået uden omrøring i ca. en halv time ved stuetemperatur. Udfældningen forventedes at være sedimenterbare stoffer, som struvit ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) eller hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). På grund af den lave koncentration af kvælstof i opløsning af filterkagerne er det mere sandsynligt at udfældningen er en calciumudfældning, f.eks. hydroxylapatit. Supplerende analyse fra Force Technology viste, at det udfældninger var amorfe, altså en miks af forskellige stoffer, som ikke er krystal-lignende. På grund af den store mængde stof er det ikke muligt direkte at definere en enkel udfældning. Analyserne viste dog, at der højst sandsynligt er tale om primært calcium baserede udfældninger, såsom hydroxylapatit.

Det var forventet, at en regulering af pH med syre i forsøg 4 og 4.1 kunne mindske udfældningerne, og at fosforen derfor ville forblive på opløst form. Dette er ikke sket, hvilket måske kan skyldes en utilstrækkelig pH regulering resulterende i en relativ høj pH i begge forsøgene. I ektraforsøget gik ca. 55 % af fosforen i konzentraten i opløsning ved pH 6.5.

En anden forventning med de to sidste forsøg var, at kvælstoffets flygtighed kunne styres ved at kontrollere pH indenfor lave til neutrale niveau. Resultaterne fra forsøgene viste, at selvom pH blev højere end ønsket i forsøgene med pH regulering, forblev en større andel af kvælstoffet som ammonium i konzentratet sammenlignet med de forsøg uden pH regulering. I forhold til massebalancerne i forsøgene endte kun en

meget lille del af det indkommende kvælstof i koncentratet. Dette skyldes højst sandsynligt en for høj og varierende pH i koncentratet. Hvis pH i periode stiger til et højt niveau henover forsøget kan kvælstof dampes af fra koncentratet, hvilket indebærer at en enkel peak i pH kan have en stor indflydelse på koncentratets kvælstofindhold.

Litteraturen siger jf. August et al. 2003, at en pH værdi under 6 er nødvendigt for total ionisering af ammoniak. Det er derfor forventet, at en bedre pH styring er muligt at styre kvælstoffet mellem destillatet og koncentratet. Det kan også være nødvendigt at sænke pH i rejktvandet, før det bliver pumpet ind til inddamperen for at undgå afdampning af kvælstof.

5.10.3 Tungmetaller

De fleste tungmetaller er ikke flygtige og kan derfor ikke dampes af i inddamperen. Det forventes derfor, at der sker en opkoncentrering af tungmetaller i inddamperen henover forsøgene. Fra analyseresultaterne findes en opkoncentrering af tungmetaller, som i forsøg 3 svarer til 5,5-36 % af den oprindelige koncentration. Den store variation i opkoncentreringsgrad forventes primært henført til analyseusikkerheder på grund af stikprøver og at tungmetallerne ikke er opløste ved pH 8,9. I forsøg 4.1 var opkoncentreringen mellem 2,7-10 % hvilket svarer meget bedre til den faktiske opkoncentrering på 2,5 %.

Ved sammenligning med slambekendtgørelsens grænseværdier for spildevandsslam som gødningmiddel kan det konkluderes at, koncentratet ville være godkendt til udspredning på landbrugsjord i så fald koncentratet skulle behandles under Slambekendtgørelsen. Der er for nikkels vedkommende i begge forsøg en overskridelse af nikkelkoncentrationen set i forhold til tørstof, men i begge forsøg er grænseværdien for nikkel i forhold til fosfor, som kan anses for at være den mest kritiske grænseværdi, overholdt.

5.10.4 Miljøfremmede stoffer

I forhold til indholdet af miljøfremmede stoffer tyder analyseresultaterne på, at rejktvandets indhold af miljøfremmede stoffer allerede er lavt, ofte under detektionsgrænsen, hvilket betyder at der ikke kan estimeres en opkoncentrering fra de tilgængelige data. Det kan dog påvises, at nogle stoffer afdampes og følger med destillatet tilbage til renseanlægget, mens andre bliver i koncentratet. I forhold til slambekendtgørelsens grænseværdier overholder koncentratet alle grænseværdier med god margin.

5.10.5 Hygiejnisering

I forhold til hygiejnisering var det ikke muligt at detektere nogle af de analyserede bakterier i koncentratet i forsøg 3. Det vurderedes derfor at inddampningsteknologien kan foretage en hygiejnisering af produktet.

I forsøg 4.1 var det dog muligt at detektere både enterokokker og E. Coli i koncentratet. Slambekendtgørelsens grænseværdier er fastsat i forhold til vådslam, hvilket gør det vanskeligt at sammenligne med de fundne mængder i koncentratet.

Slambekendtgørelsen skriver, at de godkender tre teknologier til "kontrolleret hygiejnisering" af spildevandsslam, hvor "Behandling i reaktorer, som sikrer en temperatur på mindst 70 grader celsius i minimum 60 minutter" nævnes som en mulighed (BEK nr. 1650 af 13/12/2006 - Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Slambekendtgørelsen) og tilhørende vejledning- Miljøministeriet)

Inddamperen har i forsøg 3 været drevet med en temperatur omkring 65 °C mens den i forsøg 4.1 automatisk reguleredes ned til en driftstemperatur omkring 56 °C. Inddampningen er en proces, hvor koncentratet forbliver i inddamperen over en længere tidsperiode. Resultaterne viser desværre, at temperaturen ikke har været høj nok i forsøg 4.1 til opnåelse af fuld hygiejnisering af koncentratet. En anden mulig forklaring på, at hygiejniseringen fungerede bedre i forsøgene uden syredosering er, at alkaliske pH over 9 har en hygiejniserende effekt, i hvert fald på E.Coli (Parhad 1974)

6. Vurdering af fosforgødningspotentiale

Dette kapitel beskriver forsøg udført af KU SCIENCE til belysning af to GAFOKIR-produkters fosforgødningspotentiale. De to produkter ønskedes sammenlignet med struvit samt fosfor i handelsgødning, og gødningspotentialet blev vurderet ud fra sammensætningen af næringsstoffer i produkterne, pottforsøg og inkubationsforsøg.

6.1 Metode

6.1.1 Produkter

De to GAFOKIR-produkter, som blev undersøgt, var koncentrat fra forsøg 4 (se afsnit 5.9.1) og et bundfald fremkommet ved centrifugering af koncentrat fra forsøg 3 (se afsnit 5.8.2).

Ideen med centrifugeringen var at få et mere koncentreret fosforprodukt. De to produkter ønskedes sammenlignet med struvit samt fosfor i handelsgødning. Den anvendte struvit var produktet Crystal Green fra Ostara udvundet fra kommunal spildevandsrensning. Den anvendte handelsgødning var en fosforgødning i form af triple super phosphat (TSP). Både struvit og TSP blev siet så produkterne lå inden for en kornstørrelse på 1-2 mm. Billeder af de fire gødningsprodukter, som blev anvendt i forsøgene, kan ses i figur 5, mens en karakterisering af produkterne fremgår af tabel 24

Som en del af forsøget ønskedes produkterne yderligere karakteriseret via ICP-OES analyse for deres indhold af en række grundstoffer, herunder Ca, Fe, Al, Mg, men også indholdet af P skulle verificeres.



Figur 5. De fire produkter som blev sammenlignet i pottforsøg og inkubationsforsøg.

Tabel 24. Total P, Total N, NH₄-N, tørstof og pH i koncentrat, struvit og TSP. Analyser af koncentrat og bundfald er foretaget hos BIOFOS. Analyser af struvit og TSP er foretaget hos KU.

	Koncentrat	Bundfald	Struvit	TSP
Total P	1080 mg/L	114 mg/g	131 mg/g	180 mg/g
Total N	593 mg/L	4,9 mg/g	47 mg/g	0 mg/g

NH ₄ -N	372 mg/L	0,3 mg/g	47 mg/g	-
Tørstof	-	43 %	100 %	100 %
pH	7,9	3,1	-	-

6.1.2 Pottetforsøg

De fire produkter blev afprøvet i pottetforsøg med vårbyg (var. Quench) i drivhus. Jorden som blev brugt i forsøget, var en jord med lav P-status (evt. flere detaljer om jorden: jord-sandblanding). Hver potte indeholdt 1 kg jord og der blev sået fire frø i hver potte, som efter fremspiring blev udtyndet til to planter. Alle produkter blev tilført umiddelbart inden såning i en mængde som svarede til en tilførsel på 50 mg P pr. kg jord. Tilførslen af koncentrat og bundfald blev baseret på de værdierne for total P, som det fremgår af tabel 24.

Således blev der tilført 46 ml koncentrat, 1,02 g bundfald, 0,38 g struvit og 0,28 g TSP til de enkelte potter. Det blev forsøgt at blande produkterne så homogent som muligt ind i jorden. Udover de fire produkter, indgik også en behandling uden P-tilførsel (oP), dvs. i alt fem behandlinger. Til alle behandlinger blev der tilført en næringsstofopløsning indeholdende alle andre nødvendige næringsstoffer end P, hvorved det forsøgte undgået, at mangel på andre næringsstoffer blev begrænsende for planternes vækst (evt. flere detaljer om næringsopløsningen og ekstra tilførsel af K). Seks uger efter såning blev planterne høstet og tørvægtsudbyttet, samt fosforkoncentration i plantematerialet blev bestemt. Det totale fosforoptag i planterne blev beregnet ved at gange tørstofudbyttet med fosforkoncentrationen.

I et sideløbende forsøg blev der, under de samme vækstforhold og med samme jord, lavet forsøg med stigende mængder tilførsel af P i form af TSP. Ideen med dette forsøg var at belyse, hvorvidt det kunne sandsynliggøres, at tilgængeligheden af fosfor var begrænsende for planternes vækst og dermed, og at det dermed er P-tilgængeligheden fra de afprøvede produkter, som har styret planternes vækst.

6.1.3 Inkubationsforsøg

Inkubationsforsøget blev udført ved at blande portioner af 45 g jord med de fire produkter, i samme rate som i pottetforsøget (50 mg P pr. kg jord) i tre gentagelser pr. behandling. Som i pottetforsøget blev der også lavet en behandling uden P-tilførsel, og der blev tilført en næringsstofopløsning til alle behandlinger i samme rate som i pottetforsøget). Efter tre ugers inkubation blev der udtaget prøver fra inkubationerne til bestemmelse af vandekstraherbart P, pH og elektrisk ledningsevne. Vandekstraherbart P blev bestemt ved at ryste jord og vand i forholdet 1:60 i time, hvorefter indholdet af orthofosfat i det filtrerede ekstrakt blev målt spektrofotometrisk. pH og elektrisk ledningsevne blev bestemt på en opslemning af jord og vand i forhold 1:2,5.

6.2 Resultater

6.2.1 ICP-analyse på produkterne

Totalindhold af grundstofferne P, Ca, Fe, Al, Mg, K, S, Na, Mn, Cu og Zn som bestemt via analyse på ICP-OES er vist i tabel 25 sammen med en angivelse af de enkelte elementer i forhold til P-indholdet (mg pr. g P). Indholdet af P i bundfaldet blev bestemt til præcis den samme værdi som bestemt hos BIOFOS (tabel 24), mens indholdet af P i koncentratet blev målt til at være væsentligt lavere (44%). Det betyder, at der i pottetforsøget og inkubationsforsøget kan være tilført en lavere mængde P med koncentratet, end det var tilstræbt, idet tilførslen var baseret på den koncentration, som var blevet målt hos BIOFOS.

For de øvrige elementer kan det især bemærkes, at koncentratet har et væsentligt højere indhold, relativt til P, af mange af elementerne, hvilket betyder at ved den samme P-tilførsel, tilføres f.eks. meget mere K og Na med koncentratet end med de andre produkter. Det høje indhold af især natrium kunne potentielt være problematisk ved anvendelsen som gødning, idet det kan medvirke til unødvendigt højt saltniveau i jorden. Tabel 25. Totalindhold af en række elementer i de afprøvede produkter. Resultater af ICP-OES-analyse hos KU. Resultater er vist både som mg pr. produkt og som mg pr. g P i produktet.

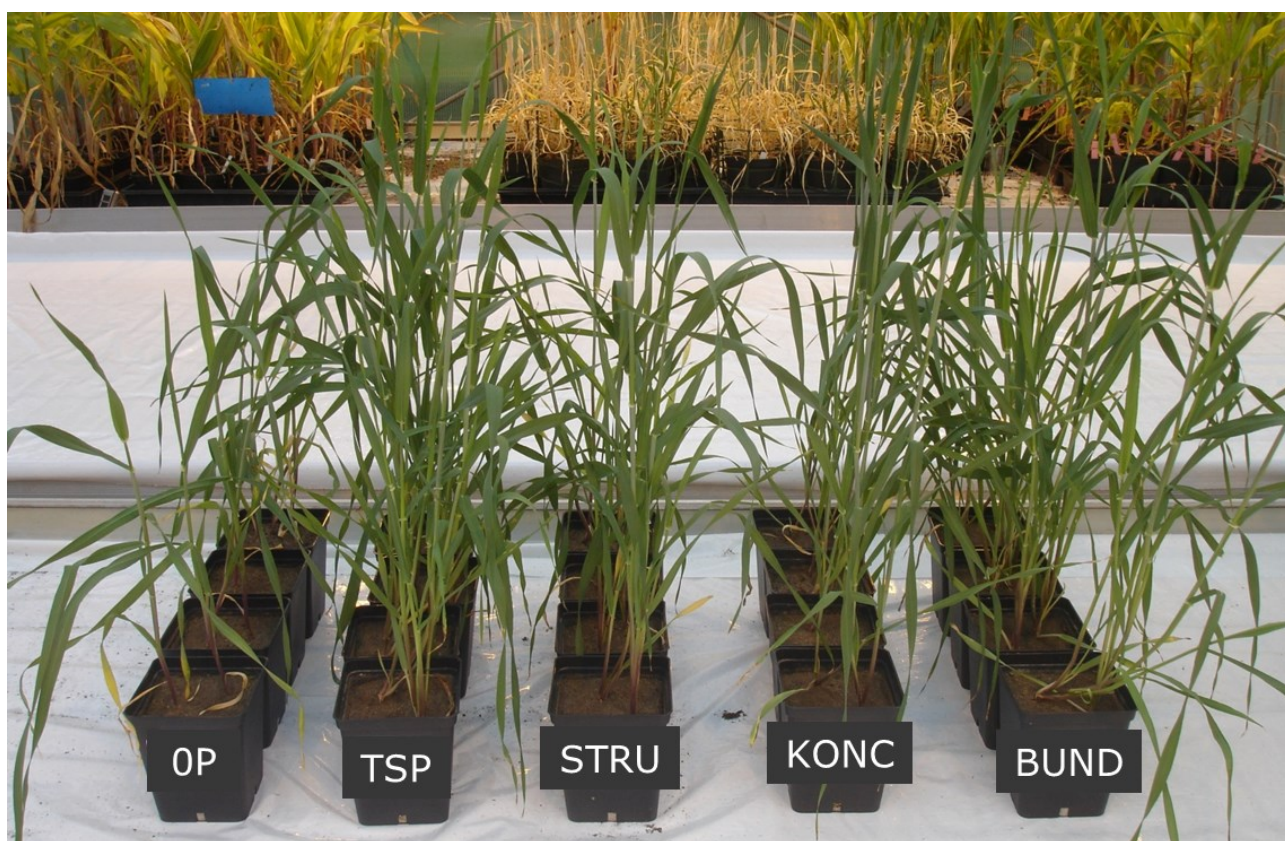
	Koncentrat	Bundfald	Struvit	TSP	Koncentrat	Bundfald	Struvit	TSP
	mg/L	mg/g tørstof			mg pr. g P			
P	605	114	131	180				
Ca	1070	171	nd	155	1768	1497	-	862
Fe	44,1	2,1	nd	1,1	73	18	-	6
Al	17,8	0,2	nd	1,0	29	2	-	5
Mg	490	68,3	99 ¹	3,2	810	598	92	17
K	1821	9,8	1,1	0,8	3008	86	9	4
S	149	1,0	0,5	15,5	246	8	4	86
Na	2228	6,8	0,4	5,9	3680	59	3	33
Mn	0,62	0,05	nd	0,01	1,02	0,45	-	0,04
Cu	0,32	0,01	nd	0,04	0,53	0,06	-	0,20
Zn	1,93	0,03	nd	0,32	3,19	0,27	-	1,77

nd = not detected. ¹Den angivne værdi for Mg i struvit er den teoretiske værdi.

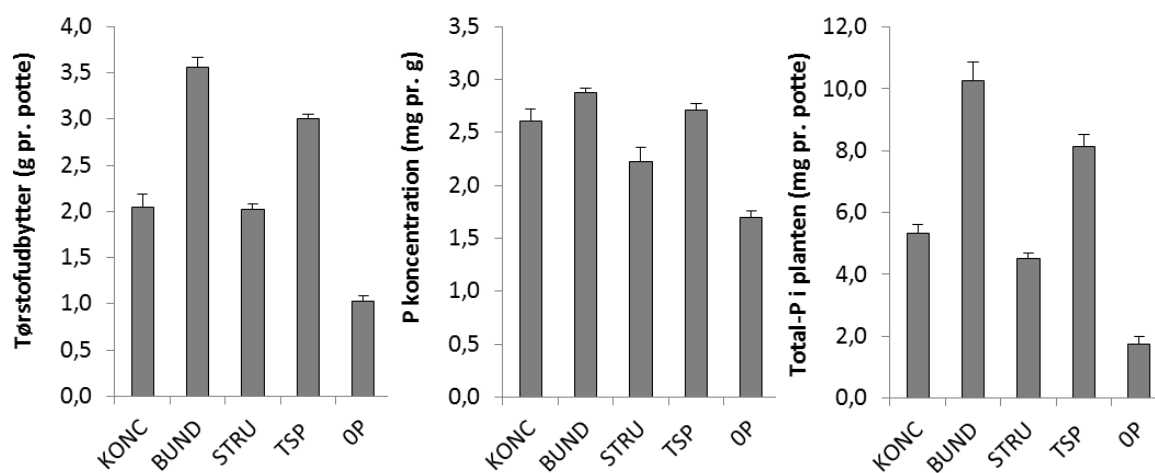
6.2.2 Pottetforsøg

Ved høst var planterne ved begyndende aksdannelse, dog med tydelige forskelle mellem behandlingerne. Behandlingen uden P-tilførsel (oP) var således stadig i starten af strækningstadiet. Et billede af planterne umiddelbart inden høst kan ses i figur 6. De forskellige behandlinger har haft tydelige effekter på både tørstofudbytter, P-koncentrationen i plantematerialet og det totale P-optag i planterne figur 7. Alle gødningsbehandlinger har øget udbytterne, samt P-koncentration og P-optag i forhold til behandlingen uden P, og generelt følger behandlingerne mønstret BUND > TSP > KONC ≥ STRU > oP. De to gødningsprodukter fra det inddampede rejeckt vand, hhv. koncentrat og bundfald, har altså begge haft en effekt som var på niveau med, eller over, struvit, og bundfaldet har yderligere haft positiv effekt sammenlignet med TSP.

Resultaterne af forsøgene med tilførsel af stigende mængder P (i form af TSP) ses i tabel 26, hvoraf det fremgår at en stigning i tilførsel af tilgængeligt P har øget tørstofudbytterne op til et niveau på omkring 3 g pr. potte (svarende til TSP-niveauet 50-P). Herefter har planterne stadig kunnet optage mere P, men de har altså ikke kunnet udnytte det til ekstra biomasse. Sandsynligvis fordi de har været begrænset af noget andet end P.



Figur 6. Billede af de 5 behandlinger (4 gentagelser af hver behandling) ved høst.



Figur 7. Tørstofudbytte (venstre), P-koncentrationer (midt) og total-P i plante (højre) for 6 uger gamle vårbygplanter, der har modtaget P i form af bundfald (BUND), koncentrat (KONC), struvit (STRU), TSP eller ingen P (oP).

Tabel 26. Tørstof-udbytter, P-koncentrationer og P-optag for bygplanterne med stigende mængder tilført P i form af TSP. Tallet foran P angiver mængden af tilført P i mg pr. kg jord. Behandlingen 50P svarer til "TSP" i figur 7.

	Tørstofudbytte (g pr. potte)	P-koncentration (mg pr. g)	Total P i planten (g pr. potte)
0P	1,03 ± 0,06	1,69 ± 0,07	1,75 ± 0,23
25P	2,48 ± 0,09	2,21 ± 0,08	5,48 ± 0,32
50P	3,00 ± 0,05	2,71 ± 0,06	8,14 ± 0,38
75P	3,18 ± 0,15	3,63 ± 0,28	11,41 ± 0,71
120P	3,05 ± 0,00	4,52 ± 0,60	12,40 ± 0,35

6.2.3 Inkubationsforsøg

Jordens indhold af vandekstraherbart P efter 3 ugers inkubation, samt jordens pH og ledningsevne fremgår af tabel 27. Jordens indhold af vandekstraherbart P er et udtryk for, hvor tilgængeligt fosforet er efter blanding med jord. Det fremgår, at der er en stor variation på bestemmelserne for behandlingerne med bundfald, struvit og TSP, hvilket er et udtryk for at disse produkter ligger inhomogent i jorden, og udtagelserne af subsamples til bestemmelse af det vandekstraherbare P er derfor afhængigt af, hvordan man rammer i forhold til det enkelte gødnings"korn" eller "klumper". Mønstret for vandekstraherbart følger mønstret, som blev set i pottforsøgene, og relativt er mønstret nok tættest på det, der blev set for P-koncentrationerne, hvor konzentratet også gav anledning til en højere P-koncentration i plantematerialet end struvit (Figur 7, midt). Mens hverken bundfald, struvit eller TSP havde nogen effekt på jordens elektriske ledningsevne og pH, så medførte tilførsel af konzentratet en lille stigning i pH, og en meget tydelig stigning i jordens elektriske ledningsevne i forhold til de øvrige.

Tabel 27. Vandekstraherbart P, elektrisk ledningsevne og pH målt på jorden efter tre ugers inkubation. Viser gennemsnittet af tre gentagelser +/- standard error. For vandekstraherbart P på bundfald, struvit og TSP er dog vist gennemsnittet af seks bestemmelser bestemmelser (to målinger på hver af de tre gentagelser).

	Vandekstraherbart P mg P pr. kg jord	Elektrisk ledningsevne mS/cm	pH
Koncentrat	10,6 ± 0,6	1,45 ± 0,05	5,20 ± 0,02
Bundfald	12,5 ± 5,3	0,92 ± 0,04	5,12 ± 0,03
Struvit	5,7 ± 1,5	0,89 ± 0,04	5,12 ± 0,03
TSP	11,0 ± 2,3	0,88 ± 0,06	5,14 ± 0,03
OP	2,9 ± 0,1	0,97 ± 0,04	5,13 ± 0,03

6.3 Diskussion

Ud fra forsøgene kan det konstateres, at både koncentrat og bundfald havde en effekt som P-gødninger. Mens tilførsel af koncentratet omtrent fordoblede tørstofudbyttet i forhold til ingen P-tilførsel, så medførte tilførsel af bundfaldet mere end en tredobling af tørstofudbyttet i forhold til OP og derudover et lidt højere udbytte end tilførsel af TSP.

Tilførsel af struvit gav i forsøget væsentligt lavere tørstofudbytte, P-koncentration og P-optag end tilførsel af TSP, hvilket er modsætning til tidligere forsøg, hvor struvit er blevet rapporteret til at have en fosforgødningseffekt på niveau med TSP (Cabeza et al. 2011). Mens TSP er en meget letopløselig P-forbindelse, er struvit er en langsomt opløselig forbindelse og omtales ofte som en "slow-release fertilizier". Den relativt dårlige virkning af struvit i pottforsøget kan skyldes den relativt korte vækstperiode på seks uger. Over en længere periode, ville struvitten måske være blevet mere tilgængeligt, og der kunne muligvis være sket en udligning af det manglende optag i starten. Under de givne forsøgsforhold må det dog konstateres, at struvit havde en lavere gødningseffekt end både TSP og bundfaldet.

Den forholdsvist gode effekt af bundfaldet tyder på, at P i bundfaldet er lettilgængeligt for planterne, hvilket også målingerne af vandekstraherbart P i jorden indikerer (tabel 27). Derudover kunne der være andre forhold, som har været medvirkende til at bundfaldet har fremmet væksten mere, end hvad der kunne opnås med samme/større mængder P tilført som TSP (figur 7 og tabel 26). Sådanne forhold kunne være en tilførsel af andre næringsstoffer, som måske har begrænset planternes vækst ved tilstrækkelige P-tilførsler. Af sammensætningen i tabel 25 fremgår det, at bundfaldet indeholder væsentligt mere af en række essentielle plantenæringsstoffer (f.eks. Ca, Fe, Mg, K og Mn) end TSP. På trods af, at alle disse næringsstoffer blev forsøgt givet i tilstrækkelige mængder med den næringsopløsning, som blev tilført til alle behandlinger før såning, kan det ikke udelukkes, at der har været en begrænsning på disse i en grad, så den ekstra tilførsel med bundfaldet har haft en betydning.

Tilførsel af koncentratet gav samme tørstofudbytter som tilførsel af struvit, mens koncentrationen i plantematerialet, og derfor også P-optaget, var en anelse højere end for struvit. Resultater for vandekstraherbart P på jorden tyder på en relativt høj tilgængelighed af P i koncentratet. Som nævnt tidligere, tyder resultater af ICP-analyse (tabel 25) på, at der kan være tilført en lavere mængde P end for de øvrige produkter, dvs. 28 mg P pr. kg jord i stedet for 50 mg P pr. kg jord. Spørgsmålet er om en højere tilførsel, ville have givet højere tørstofudbytter. Resultaterne indikerer, at dette måske ikke ville være tilfældet, for selvom planterne, der har fået koncentrat, havde et højere P-optag end planterne, der har fået struvit, så har de ikke kunnet omsætte dette til ekstra biomasse. Der kan derfor være andre ting, der har begrænset planternes vækst. Dette kunne f.eks. være et højt saltindhold, og dermed saltstress, pga. de

store mængder ioner, især K og Na, som tilførtes sammen med koncentratet (se tabel 25). Dette medførte en tydeligt øget elektrisk ledningsevne (1,45 mS/cm) i forhold til de øvrige behandlinger (tabel 27). Ifølge Smith & Doran (1996) vil en ledningsevne på omkring 4,5-5,7 mS/cm, målt i en jord-vand-opslæmning i forholdet 1:1, kunne betyde udbyttereduktion for vårbyg. I vores forsøg blev ledningsevnen målt på jord-vand-opslæmninger i forholdet 1:2,5. Omsættes dette til 1:1-forholdet giver det en ledningsevne for koncentrat-jorden på 3,6 mS/cm. Det vil sige tættere på den grænse som Smith & Doran (1996) angiver, men ikke over. Der har derfor sandsynligvis ikke været tale om udpræget saltstress, men det kan ikke udelukkes, at det har haft en vis indflydelse på planternes vækst.

En vurdering af anvendelsesmulighederne for koncentratet eller bundfaldet som gødningsprodukt i landbruget vil udover fosforgødningsværdi, også skulle inkludere en vurdering af de praktiske håndteringsmuligheder, samt også indholdet af andre næringsstoffer, især N, i produkterne. For koncentratet er der tale om et relativt "tyndt" produkt, hvor indholdene af N og P ligger omkring hhv. 1 og 0,6 g/L (heraf ca. 60 % $\text{NH}_4^+\text{-N}$). Til sammenligning indeholder gylle omkring samme mængde P, eller lidt mindre, men væsentligt mere N (groft estimeret omkring 3 g/L, hvoraf ca. 60 % er $\text{NH}_4^+\text{-N}$) (Sørensen et al. 2015). For at udbringe en fosfor-mængde svarende til 20 kg P/ha, ville det kræve en udbringning omkring 30 m³ koncentrat pr. ha, hvilket vil bidrage med kun 20 kg total-N/ha (kvælstofnormen for f.eks. vårbyg ligger på omkring 110-130 kg N/ha, afhængigt af jordtypen), altså en næsten ubetydelig N-mængde. Alt i alt vil der med de koncentrationer, som findes i koncentratet, skulle transporteres meget store volumener fra renseanlæg til landbrug, hvilket i mange tilfælde ikke ville kunne betale sig. For et produkt som bundfaldet, hvor P-koncentrationen er betydeligt højere, er der sandsynligvis større potentiale, og en tilførsel af 20 kg P/ha vil kun kræve udbringning af omkring 400 kg produkt pr. ha.

6.4 Konklusion

Overordnet vurderes det, at begge afprøvede GAFOKIR-produkter indeholder fosfor, som er tilgængeligt for plantevækst, og at begge har en fosforgødnings effekt, som er minimum på niveau med struvit. Det vurderes samtidig, at det største potentiale som fosforgødning ligger i bundfalds-produktet frem for selve koncentratet. Dels fordi bundfaldet havde en effektiv gødningsvirkning. Og dels fordi koncentratet indeholder relativt lave koncentrationer af P, hvilket øger transportomkostninger, og samtidig har et meget højt indhold af salte, der kan være uhensigtsmæssige at tilføre til jorden i større mængder.

7. Business case og markedspotentiale

I dette afsnit præsenteres et eksempel på, hvordan en business case for et renseanlæg kan se ud for et renseanlæg på Renseanlæg Avedøres størrelse (350.000 pe).

Der er to muligheder til anvendelse af inddampningsteknologi, enten med egen varmekilde eller med ekstern varmekilde. Der er et eksisterende slamforbrændingsanlæg på renseanlægget, hvorfra genereret overskudsvarme kan udnyttes. Hvis det er muligt at bruge denne varme til opvarmning af rejeftvand kan opnås besparelse på tilførsel af el energi.

Den aktuelle rejeftvandsmængde på Renseanlæg Avedøre er ca. 1000 m³/dag.

Det er en relativ stor mængde pga. lave slamkoncentrationer i rådnetankene. Det antages for den efterfølgende vurdering, at man i fremtiden vil opkoncentrere slammet således at der kun vil være en tredjedel af denne rejeftvandsmængde (330 m³/dag). I denne mængde ligner rejeftvandet også mere det typiske på danske renseanlæg.

Den daglige rejeftvandsmængde antages at indeholde 400 kg N og 100 kg P.

7.1 Forfiltrering af rejeftvandet

Under pilotforsøgene har der været relativt høje koncentrationer af suspenderet stof i rejeftvandet. Det kan være nødvendigt at installere et forfilteringsanlæg f.eks. i form af et tromlefilter til reduktion af indholdet af suspenderet stof i rejeftvandet.

Filterkapacitet 330 m³ /dag.

Estimeret pris 50.000 kr

7.2 Inddampningsanlæg

Herunder er beskrevet to forskellige alternativer. For begge systemer angives kapaciteten i produceret rent vand (destillat). Der regnes med en opkoncentrering på 95 %.

Det medfører en daglig produktion på 313 m³ destillat og 17 m³ koncentrat.

Alternativ 1 – El opvarmet anlæg

I det første alternativ for et fuldskalaanlæg bruges el til opvarmning af rejeftvandet. Denne proces fungerer på samme måde som det pilotanlæg, som blev afprøvet i pilotskala. Der er anslået nedenstående overslagspriser for et inddampningsanlæg til behandling af 330 m³/d eller svarende til rejeftvand fra et renseanlæg med en kapacitet på 350.000 personækvivalenter:

- Inddamper 1 stk. VAP2 med en kapacitet på 2 x 2 500 l/h overslagspris 5 millioner SEK eksklusiv tilslutning
- 2 ekstra enheder (fælles inddamper, separate rammer) koster ca. 4 millioner SEK/st.

I alt ca. 13 mio SEK = ca. 10,4 mio. DKK – (1 SEK = 0,80 DKK).

Tilslutning af inddampere anslås at koste i alt 100.000 DKK.

Alternativ 2 – opvarmet med overskudsvarme

I alternativ 2 anvendes en inddamper som udnytter overskudsvarme fra f.eks. forbrændingsanlægget:

- Inddamper 1 stk. VAP2 med en kapacitet på 2 x 2500 l/h . Overslagspris 4 millioner SEK ekskl. tilslutning.
- 2 ekstra enheder (fælles inddamper) koster ca. 3 millioner SEK/stk.

I alt ca. 10 mio. SEK = 8 mio. DKK.

7.3 Øvrige anlægs omkostninger

7.3.1 Tanke og rør

Der opføres et syrelager, lagertank buffertank.

Der inkluderes div. rør.

I alt 350.000 kr.

7.3.2 El og SRO

Forsyning med strøm. El-skabe mv.

Styring af inddampning, syredosering mv.

Tilslutning til RA SRO 5 % af anlæg (1) : 520.000 kr.

(billigere ende fordi det tænkes indbygget i et eksisterende SRO anlæg)

7.3.3 Samlet investering

De samlede investeringsomkostninger for alternativ 1 anslås til ca. 11,50 mio. kr.

7.4 Driftsudgifter

7.4.1 pH regulering.

I nogle af pilotforsøgene blev doseret saltsyre for at kontrollere pH under inddampningen. Der var dog væsentlige tekniske vanskeligheder med tilbagestrømning og med at styre dosering så pH blev fastholdt på 6 eller 6,5.

På basis af målinger af alkalinitet i centrifugat fra Renseanlæg Avedøres rådnetanksslam, er der estimeret et syreforbrug på 6 kg konc. saltsyre (30%) pr m³ rejekt der går til inddampning.

Der skal således anvendes 2 tons saltsyre om dagen.

Estimeret udgift 4.000 kr./dag (250US\$+20%/ton saltsyre)

Denne driftsomkostning vil afhænge af sammensætningen af rejektvandet i det pH justering og dermed syreforbruget afhænger af bufferkapaciteten. Syreforbruget vil således være markant lavere andre steder i det vandet generelt har en høj alkalinitet i hovedstadsområdet.

7.4.2 Energi til inddampning

Alternativ 1.

Energiformen er elektricitet.

Inddampning forventes normalt at kræve 35-50 kWh/m³ destillat.

Det daglige el forbrug til inddampning vil således udgøre ca. 14 MWh/d (udgift ca. 11.300 kr./dag) (45 kWh/m³, 800 kr./MWh)

Alternativ 2. Denne enhed bygger på at man anvender varmt vand/damp eller lignende. Energiforbruget vil være ca. 700 kWh/m³ hvilket er ca. 15 gange så meget som i alternativ 1, med et dimensioneret effektforbrug på 800 kWh/m³. Forudsætningen er på grund af det meget høje forbrug at inddamperen kan udnytte billigt varmt vand/damp med minimum 80 °C samt at der er tilgang til kølemedia med en maks. temperatur på 30 °C.

Det daglige varme forbrug til inddampning vil således udgøre ca. 220 MWh/d. Dette kan være interessant hvis varmen ellers var gået til spildevand og derfor er gratis til rådighed. Hvis det kræver køb af fjernvarme vil det koste ca. 66.000 kr./dag ved en fjernvarmepris på 30 øre/KWh. På Renseanlæg Avedøre ville en sådan løsning kræve afkald på salg af fjernvarme, og dermed en mistet indtægt på ca. 66.000 kr./dag.

7.5 Besparelser på hovedanlæg

7.5.1 Værdi af produceret gødning

Som vist i kapitel 5 er det analyserede indholdet af miljøfremmede stoffer meget lavt, og det analyserede indhold af tungmetaller er væsentligt under slambekendtgørelsens grænseværdi (nikkel er det eneste tungmetal som er i nærheden af grænseværdien).

For at øge koncentrationens markedsværdi kan det overvejes at søge det godkendt som regulært gødningsprodukt udenfor slambekendtgørelsen, på samme måde som andre har gjort for Struvit. Det er med de nuværende regler administrativt tungt og tidskrævende at opnå en sådan godkendelse. EU's igangværende arbejde med Cirkulær Økonomi pakken forventes på sigt føre til en simplere godkendelsesprocedure. Udgift til arbejde med at opnå godkendelse er ikke medtaget i business casen.

Værdien af næringsstoffer i handelsgødning er ifølge SEGES med 2015 prisniveau ca. 11 kr./kg P og ca. 8,5 kr./kg N.

Hvis produktet kan opnå samme værdi som handelsgødning, kan der opnås følgende indtægt:

- P værdi 11 kr/kg P : $11 \times 100 = 1.100$ kr/dag (her er ikke taget højde for at en del af fosforen ikke genfindes i koncentrationen)
- N Værdi 8,5 kr/kg : $8,5 \times 350 = 2.975$ kr/dag

I business casen er det mere konservativt antaget af produktet afsættes til 0 kr., det vil sige at udgiften til transport, opbevaring og udbringning af koncentrationen modsvarer gødningsværdien.

Hvis koncentrationen ikke godkendes som regulært gødningsprodukt må det forventes at aftagere vil kræve betaling for at modtage det.

7.5.2 Anlægskapacitet

Der vindes proceskapacitet i hovedstrømmen ved at fjerne N og P som ellers sendes tilbage til biologisk behandling.

Værdi (6 kr/kg N og 19 kr/kg P) $375 \times 6 + 100 \times 19 = 4.150$ kr/dag. Disse værdier gælder for Renseanlæg Avedøre, men må forventes at variere fra anlæg til anlæg.

7.6 Nutidsværdiberegning

Med udgangspunkt i priser, mængder og antagelser i dette kapitel er der opstillet en nutidsværdiberegning som er gengivet i kort form i bilag 4.

Nutidsværdiberegningen siger bl.a. at

- Prisen for energi vejer meget tungt i omkostningerne.
Et mere energirigtigt anlæg vil være nødvendigt, evt. baseret på overskudsvarme af ringe værdi.
- Det koster overslagsmæssigt og som gennemsnit 26 kr pr. kg N eller P fjernet. Dette er relativt meget dyrere end den rå pris på kunstgødning. Det kunne undersøges om økologisk landbrug vil være villig til at betale en merpris af den størrelsesorden for et rent produkt, produceret i Danmark af danske råmaterialer.

7.7 Markedspotentiale

Genvinding af ressourcer fra spildevand, herunder særligt fosfor, vil reducere forbruget af en ikke fornybar ressource og er på denne måde globalt set et vigtigt udviklingsfelt, som det også er dokumenteret i den nye rapport fra Miljøstyrelsen "Innovationspartnerskab for anvendelse af fosfor fra spildevand og spildevandsslam fra spildevandsforsyninger".

Der findes som beskrevet flere eksisterende teknologier til genvinding af næringssalte fra rejeckt vand fra udrådning af slam fra renselanlæg. De fleste af disse teknologier giver dog ikke mulighed for genanvendelse af kvælstof.

En inddampningsløsning går udover nuværende lovgivningsmæssige krav, idet der i Danmark ikke er indført krav om genvinding af næringssalte fra spildevand.

Processen er baseret på en termisk behandling af rejeckt vand. Forudsat at problemet med at der "mangler" noget fosfor løses, forventes resultatet at være skalerbart til kommercielle fuldskalaanlæg, som tænkes opbygget i moduler. Udvikling af moduler gør det nemt at tilpasse processens kapacitet til et aktuelt renselanlægs behov.

Teknologien kan være interessant for kommunale renselanlæg med rådnetank og industrielle renselanlæg med egnet strøm med et højt indhold af fosfor og kvælstof. For anlæg med adgang til billig varme vurderes det, at inddampningsteknologien har et markedspotentiale i første omgang i Skandinavien, men teknologien kan også være et interessant koncept for intelligent udnyttelse af ressource i spildevand globalt set. I første omgang i de mere industrialiserede lande.

Der er i Danmark installeret et lille antal anlæg til genvinding af fosfor fra rejeftvand baseret på 'Magnesium støttet' udfældning af struvit. Herved genvindes fosfor og en mindre del af kvælstoffet. I modsætning til de mere kendte struvit fældningsmetoder genvinder inddampning hovedparten af både fosfor og kvælstof i rejeftvandet/den egnede strøm. Endvidere er der ikke behov for tilsætning af Magnesium som ved struvit udfældning.

Udvikles den nye teknologi i Danmark kan det danne grundlag for skabelse af flere grønne arbejdspladser. Der skal tilknyttes flere partnere i projekter herunder en rådgiver, leverandører, forsyninger.

Der findes i dag 57 renseanlæg med rådnetanke i Danmark og omkring 200 i Sverige. Hertil kommer øvrige biogas anlæg i Skandinavien, som også kunne have brug for at genvinde næringssaltene i rejeftvand (i det omfang slammet afvandes).

Afsætningen af *produktet* – koncentreret rejeftvand er ikke helt kortlagt endnu. Det er påvist at der er et godt gødningspotentiale og ingen fremmede stoffer i koncentratet.

Det bør derfor kunne godkendes som et gødningsprodukt på linje med struvit. Herved øges afsætningsmuligheder og markedsværdien betydeligt. Det kræver dog et større godkendelses arbejde hos relevante myndigheder.

8. Konklusion

Resultaterne fra pilotforsøg med inddampning af rejeftvand fra BIOFOS Renseanlæg Avedøre kan sammenfattes som nedenstående:

- Det er teknisk muligt at inddampe rejeftvand fra afvandet spildevandsslam.
- Fosfor forbliver i koncentratet (gødningsproduktet), og der sker en udfældning af amorft materiale som indeholder ca. 11 % fosfor.
En massebalance over inddampningsanlægget viser at der 'mangler' noget fosfor i koncentratet. Formodentlig fælder fosforsalte ud i anlægget.
- Forsøgene indikerer at det er muligt at styre fordelingen af det opløste kvælstof mellem koncentratet og destillatet ved at kontrollere pH i reaktoren. Ved optimeret pH styring forventes det at være muligt at fordele størstedelen til koncentratet hvis det er ønskeligt.
Det kræver en god regulering af syredosering.
- Koncentratet (gødningsproduktet) forventes med stor margin at kunne overholde slambekendtgørelsen (fra 2016 affald til jord bekendtgørelsen) for udbringning på landbrugsjord både med hensyn til indholdet af tungmetaller og miljøfremmede stoffer.
- Markedsværdien af koncentratet vil kunne øges hvis der søges og opnås godkendelse som gødningsprodukt uafhængigt af slam/ affald til jord bekendtgørelsen
- Ved en driftstemperatur over $>65^{\circ}\text{C}$ i inddampningsanlægget forventes det at koncentratet (gødningsproduktet) er stabilt hygiejniseret.
- Potteforsøg har vist at det inddampede rejeft vand har en udmærket fosforgødningseffekt.

En business case viser at inddampning er relativt dyr i sammenligning med andre teknologier til genbrug af næringssalte (udfældning af struvit)

Inddampning kan dog godt måle sig med ammoniak-stripning, som er den eneste anden kendte metode til at genvinde kvælstof fra rejeftvand.

9. Perspektivering

Formålet med udviklingsprojektet var

- at introducere inddampning som teknologi til genvinding af fosfor og kvælstof fra rejeckt vand på et kommunalt renseanlæg
- at fastlægge kvaliteten af det producerede koncentrat og vurdere muligheder for direkte anvendelse eller oparbejdning af dette koncentrat som gødningsmedie.
- at kortlægge indflydelse af temperatur, pH forhold og egenskaber i det indkommende rejeckt vand/egnet delstrøm på funktionen af teknologien, kvalitet på koncentratet og en evt. separat strøm med NH_3 -holdigt vand.
- at belyse påvirkninger i form af belægninger og andre driftsforstyrrelser samt indhold af miljøfremmede stoffer og tungmetaller i produktet

Disse punkter er opfyldt af det udførte projekt.

Der er dog ikke fundet nogen aftagere til produktet. Dette skal der i givet fald arbejdes videre enten direkte med store landbrug eller med virksomheder, der kan oparbejde produktet med evt. øvrige gødningskomponenter.

Nogle aspekter af projektets resultater bør uddybes i yderligere forsøg eller ved en første fuld skala installation.

Det drejer sig især om skæbnen for fosfor under inddampningen. Massebalancerne for fosfor over inddampningsanlægget viser at en del af fosfor formodentlig afsættes i anlægget uden at dette kunne observeres fysisk. Det er naturligvis væsentligt at konstatere om der afsættes fosforsalte, om de opløselige og om designet af anlægget kan tilpasses denne omstændighed.

En væsentlig fordel ved at genvinde kvælstof og fosfor fra rejeckt vandet er, at renseanlæggets hovedstrøm (aktiv slam anlægget) friholdes fra denne belastning, og dermed får større kapacitet til at modtage spildevand. Destillatet ledes tilbage til renseanlægget og i det omfang der stadig er kvælstof tilbage i destillatet vil det belaste renseanlægget. Det er pH reguleringen der sikrer at kvælstof bliver i koncentratet. Reguleringen af pH med henblik på at sikre at kvælstof bliver i koncentratet har dog vist sig at være vanskelig i pilotanlægget. Der bør ske en udvikling af en bedre regulering og bedre fastlæggelse af i hvor stor grad kvælstoffet kan fastholdes i koncentratet.

Det bør overvejes om der med fordel kan anvendes andre syrer end saltsyre som blev anvendt i dette projekt. Svovlsyre er billigere og giver en større gødningsværdi, men kan muligvis give andre udfældningsproblemer.

Produktet fra inddampning er, selvom det er væsentlig mere koncentreret end 'råt' rejeckt vand stadig relativt tyndt i forhold til kommercielle gødningstyper, både flydende og faste.

Det er teknisk muligt at opkoncentrere yderligere, men det skal i givet fald undersøges om det giver anledning til mere bundfald og udfældninger i anlægget.

Det er et åbent spørgsmål hvordan produktet skal håndteres fra inddamper til anvendelse.

Der er i princippet to produkter i det en stor del af forfor fældes ud som bundfald medens kvælstof forbliver opløst.

Denne blanding af fast og flydende gødning er ikke ideel for landbrugsbrugere der helst kun kører én gang årligt på marken med en maskine der enten er egnet til fast eller flydende gødning. . Yderligere er der behov for afklaring af, om det relativt høje indhold af salte i koncentratet kan blive problematisk for plantevækst (give anledning til saltstress) ved udbringning over en årrække.

Energiforbruget til inddampning er højt selvom der er tale om vakuum destillation.

Bedre energigenvinding ville gøre teknologien mere attraktiv.

I øjeblikket vil denne teknologi nok kun være attraktiv såfremt der på et renseanlægget findes en kilde til billig eller gratis grønt varmt vand til inddampningen.

10. Formidling

En central del i at gennemføre et udviklingsprojekt er at formidle resultater, konklusioner og erfaringer fra det gennemførte udviklingsprojekt, så videndeling i branchen på forskellige niveauer sikres.

Der er i projektets forløb udgivet artikler og holdt indlæg på konferencer.

- Spildevandsteknisk tidsskrift:
 - Artikel om vision med udviklingsprojekt er udgivet i nr. 4, 2014
 - Der er planlagt en artikel omkring projektets konklusioner
- Cirkulation
 - Artikel om vision med udviklingsprojekt er i nr. 8 af 2014
 - Der er planlagt en artikel omkring projektets konklusioner
- NORDIWA Nordisk spildevands konference. Nov. 2015. Indlæg v. Joakim Faxå, Envidan.
- Dansk Vand konference nov. 2015 - Indlæg ved Dines Thornberg, BIOFOS
- Dansk Vand tidsskrift - Planlagt artikel om projektkonklusioner

Referencer

Andersen, F *et al* (1965) Håndbog i Fysik og Kemi, 16. udgave, 1. oplag, Nordisk Forlag. København.

Bonmatí, A. and Flotats, X. (2003). Pig slurry concentration by vacuum evaporation: influence of previous mesophilic anaerobic digestion process. *Journal of the air & waste management association*. Vol.53, pp 21-31.

Cabeza R, Steingrobe B, Römer W, Claassen N (2011) Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutr Cycl Agroecosystems* 91:173–184. doi: 10.1007/s10705-011-9454-0

Dahlberg, C (2010) Biogödsselförädling – Tekniker och leverantörer, Svenskt Gastekniskt Center. Rapport SGC 221

Metcalf & Eddy, (2004). *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse*. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill Education

Miljøprojekt nr. 1460. (2013). Innovationspartnerskab for anvendelse af fosfor fra spildevand og spildevandsslam fra spildevandsforsyninger. “Fosforpartnerskabet”

Miljøstyrelsen (2014). Fosforgenvinding ved struvitutfældning. Åby renseanlæg, Aarhus.

Parhad, N. M. and Rao, N.U. (1974). “Effect of pH on survival of *Escherichia coli*.” *Journal WPCF*. Vol.46, No.5, pp 981-987.

Smith JL, Doran JW (1996) Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis. *Soil Sci Soc Am* 49:169–185. doi: 10.2136/sssaspecpub49.c10

Sørensen MK, Jensen O, Bakharev ON, et al. (2015) NPK NMR Sensor: Online Monitoring of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Animal Slurry. *Anal Chem* 87:6446–50. doi: 10.1021/acs.analchem.5b01924

University of Florida (UF) (1971) Feasibility of treating wastewater by distillation, Environmental Protection Agency, Project #17040

Bilag

Bilag 1. Vapotec_Laboratorieforsøg-resultater

Bilag 2. Analysemetoder. Eurofins og BIOFOS

Bilag 3. FORCE_Laboratorieforsøg-resultater

Bilag 4. Nutidsværdiberegning

NOTAT

Dato: 30. juni 2014

Projekt navn: GAFOKIR
Projekt nr.: 114 4962
Udarbejdet af: Kent Edmunds-
son/Joakim Faxå
Kvalitetssikring: Jeanette Agertved Mad-
sen
Modtager: Projektgruppen
Side: 1 af 7

Vedr.: Laboratorieforsøg med inddampning af rejeftvand fra udrådning af spildevandsslam

1. Indledning

Den 30. April, 2014 modtog Vapotec ca. 60 liter rejeftvand fra Spildevandscenter Avedøre.

De efterfølgende to uger er gennemført forsøg med inddampning af rejeftvandet i laboratorieskala hos Vapotec. Der er udført to forskellige inddampningsforsøg.

2. Forsøgsbeskrivelse

Initialt filtreres rejeftvandet gennem en 40 og en 20 µm filtredug. Disse filtrater er derefter sendt til analyse på eksternt laboratorie.

Derefter aftappedes 25 liter filtreret rejeftvand. Det filter, som blev brugt til at filtrere rejeftvandet, havde en lidt større poreåbning end 40 µm, men var stadigvæk så fin at væsken blev parikelfri, ifølge vore visuelle bedømmelse.

Derefter inddampedes disse 25 liter, så langt som muligt i vores laboratorieinddampner.

Følgende prøver blev taget ud under hvert forsøg;

- 0-prøve - kontrol med ubehandlet rejeftvand
- Koncentrat (opkoncentrerede strøm = produkt) - resten efter afsluttet inddampning
- Destillat 1- 3 (ren væske = biprodukt) - Det blev udtaget 3 destillatprøver (samlingsprøver) fra ca. 1:e, 2:e og 3:e tredjedelen af destillatet.

Forsøg 1 - Her blev pH initialt sænket til lidt under 6 med saltsyre. pH blev ikke justeret mere under forsøget.

Forsøg 2 - Her blev pH initialt sænket til under 6 med slatsyre. pH blev løbende korrigeret under inddampningsforløbet til lidt under 6 ved tilsat at saltsyre.

Mere information om inddampningsforsøgene og de forskellige observationer findes i de to separate testrapporter, se Bilag 1. Det er udtaget en række delprøver under forsøgene prøverne er analyseret for både de normale spildevandsparametre, men også for metaller på eksternt laboratorie.

EnviDan

3. Resultater

3.1 Forsøg 1

Tabel 1; Analyse resultater fra forsøg 1

Forsøg 1		0-prøve	Filtreret prøve	Koncentrat	Destillat 1	Destillat 2	Destillat 3
Parametre							
Volumen	l	25		1			
BOD ₇	mg/l	31,8	30	551	<1.0	<1.0	<1.0
COD _{Cr}	mg/l	366	326	2880	<5.0	<5.0	<5.0
P-tot	mg/l	63,4	66,3	150	<0.010	<0.010	<0.010
N-tot	mg/l	384	408	1210	200	245	469
NH ₄ -N	mg/l	388	388	1170	154	192	377
SS	mg/l	283	217	1840			
pH		7,68	7,71	7,55	9,74	9,77	9,87
TOC	mg/l	54,7	69,3	778	1,34	1,01	1,34
As	µg/l	7,65	7,46	101	<1	<1	<1
Cd	µg/l	0,267	0,227	0,615	<0.05	<0.05	<0.05
Co	µg/l	2,15	2,46	30,6	<0.05	<0.05	<0.05
Cr	µg/l	1,23	1,36	6,76	<0.5	<0.5	<0.5
Cu	µg/l	7,22	9,73	67,5	38,5	45,8	134
Mo	µg/l	10,4	8,14	174	0,687	<0.5	0,632
Ni	µg/l	16,8	15,3	297	0,834	<0.5	0,629
Pb	µg/l	1,09	1,18	4,25	<0.2	<0.2	<0.2
Zn	µg/l	41,3	52,1	1270	10,2	10,7	29,2
V	µg/l	0,572	0,7	286	0,156	0,128	0,127

Baseret på resultaterne i tabellen oven kan følgende massebalance findes;

Tabel 2; Massebalance forsøg 1

Forsøg 1		0-prøve	Koncentrat	% i koncentrat
Parametre				
Volumen	l	25	1	
BOD ₇	mg	795	551	73,5%
COD _{Cr}	mg	9150	2880	31,5%
P-tot	mg	1585	150	9,5%
N-tot	mg	9600	1210	12,6%
NH ₄ -N	mg	9700	1170	12,1%
SS	mg	7075	1840	26,0%
pH		192	7,55	3,9%
TOC	mg	1367,5	778	56,9%
As	µg	191,25	101	52,8%
Cd	µg	6,675	0,615	9,2%
Co	µg	53,75	30,6	56,9%
Cr	µg	30,75	6,76	22,0%
Cu	µg	180,5	67,5	37,4%
Mo	µg	260	174	66,9%
Ni	µg	420	297	70,7%
Pb	µg	27,25	4,25	15,6%
Zn	µg	1032,5	1270	123,0%

V	µg	14,3	286	2000,0%
---	----	------	-----	---------

3.2 Forsøg 2.

Tabel 3; Analyse resultater fra forsøg 2

Forsøg 2		0-prøve	Filtreret prøve	Koncentrat	Destillat 1	Destillat 2	Destillat 3
Parametre							
Volumen		27		0,5			
BOD ₇	mg/l	44,5	13,4				
COD _{Cr}	mg/l	386	172	18000	<1.0	<1.0	<1.0
P-tot	mg/l	90,1	59,3	2090	<5.0	<5.0	<5.0
N-tot	mg/l	398	397	12500	<0.010	<0.010	<0.010
NH ₄ -N	mg/l	391	390	13400	143	28,1	13,3
SS	mg/l	222	75,3	10700	112	22,8	15,6
pH		7,56	7,62	4,74			
TOC	mg/l	50,8	53,9	2210	9,76	9,6	9,4
					1	0,6	0,78
As	µg/l	6,93	6,24	234	<1	<1	<1
Cd	µg/l	0,165	<0.05	<5	<0.05	<0.05	<0.05
Co	µg/l	2,1	2,19	101	0,104	<0.05	0,103
Cr	µg/l	<1	<0.5	<50	<0.5	<0.5	<0.5
Cu	µg/l	76,1	14,5	860	16,3	2,42	1,1
Mo	µg/l	2,1	1,61	230	<0.5	<0.5	<0.5
Ni	µg/l	28,3	22,3	1110	<0.5	<0.5	<0.5
Pb	µg/l	6,97	0,745	48,3	<0.2	<0.2	<0.2
Zn	µg/l	229	44,4	3830	5,41	3,19	4,19
V	µg/l	0,398	1,11	442	0,0904	0,207	0,0656

Baseret på resultaterne i tabellen oven kan følgene massebalance findes;

Tabel 4; Massebalance forsøg 2

Forsøg 2		0-prøve	Koncentrat	% i koncentrat
Parametre				
Volumen	l	27	0,5	
BOD ₇	mg	1201,5		
COD _{Cr}	mg	10422	9000	86,4%
P-tot	mg	2432,7	1045	43,0%
N-tot	mg	10746	6250	58,2%
ammoniumkvæve	mg	10557	6700	63,5%
suspenderet substans	mg	5994	5350	89,3%
pH		204,12	2,37	1,2%
TOC	mg	1371,6	1105	80,6%
As	µg	187,11	117	62,5%
Cd	µg	4,455		0,0%
Co	µg	56,7	50,5	89,1%
Cr	µg	<1	<50	
Cu	µg	2054,7	430	20,9%
Mo	µg	56,7	115	202,8%
Ni	µg	764,1	555	72,6%
Pb	µg	188,19	24,15	12,8%
Zn	µg	6183	1915	31,0%
V	µg	10,746	221	2056,6%

Analyseresultaterne på koncentratet er også blevet sammenlignet mod slambekendtgørelsens grænseværdier for metaller i slam ved udbringning af disse på landbrugsjord.

Tabel 5; Sammenligning mellem fosfor og metaller i koncentrat og grænseværdier fra slambekendtgørelsen

Parametre	Grænseværdi	Forsøg 1	Forsøg 2	Grænseværdi	Forsøg 1	Forsøg 2
	mg/kg SS	mg/kg SS	mg/kg SS	mg/kg TP	mg/kg TP	mg/kg TP
Cadmium	0,8	0,3	Ikke måleligt	100	4,1	Ikke måleligt
Kviksølv	0,8	N/A	N/A	200	N/A	N/A
Bly	120	2,3	4,5	10.000	28,3	23,1
Nikkel	30	161,4	103,7	2500	1980,0	531,1
Krom	100	3,7	Ikke måleligt			
Zink	4000	690,2	357,9			
Kopper	1000	36,7	80,4			

På grund af dårlig sammenhæng mellem mængderne i 0-prøvene og koncentrationerne sammenlignes også resultaterne fra analyserne af de filtrerede prøverne mod grænseværdierne i slambekendtgørelsen her neden.

Tabel 6; Sammenligning mellem fosfor og metaller i filtreret 0-prøve og grænseværdier fra slambekendtgørelsen

Parametre	Grænseværdi	Forsøg 1	Forsøg 2	Grænseværdi	Forsøg 1	Forsøg 2
	mg/kg SS	mg/kg SS	mg/kg SS	mg/kg TP	mg/kg TP	mg/kg TP
Cadmium	0,8	1,0	Ikke måleligt	100	3,4	Ikke måleligt
Kviksølv	0,8	N/A	N/A	200	N/A	N/A
Bly	120	5,4	9,9	10000	17,8	12,6
Nikkel	30	70,5	296,1	2500	230,8	376,1
Krom	100	Ikke måleligt	Ikke måleligt			
Zink	4000	240,1	589,6			
Kopper	1000	Ikke måleligt	192,6			

4. Diskussion

4.1 Filtrering

Det er vanskeligt at foretage entydige konklusioner på basis af filtreringsforsøgene. De forskellige analyseresultater varierer så kraftigt at nogle reduktionsgrader egentlig ikke kan bestemmes.

Det virker dog som at, 20 µm filtret giver en lidt bedre reduktion af SS og metaller end 40 µm filtret. Desuden virker det som, at en metallerne hovedsagelig forefindes på suspenderet form eller adsorberet på meget små partikler.

Det bør undersøges om der foreligger dokumentation for, hvorledes forskellige metaller forekommer i rektvand. I hvert fald bør nogle simple filtreringsforsøg udføres så at et bedre grundlag vedr. nødvendigheden af filtrering før inddampning.

4.2 Inddampningsforsøg 1

I dette forsøg blev pH initialt sænket til ca. 5,8 ved dosering af saltsyre. Derefter udførtes inddampningsforsøget uden videre justering af pH.

Den initiale volumen på 25 liter blev koket ned til ca. 1 liter (koncentrat), dvs. opkoncentreringsfaktoren var ca. 20 gange (eller ca. 96 % blev til destillat og 4 % blev til koncentrat).

Baseret på resultatet af analyserne på destillaterne kan man se at der er en god separation af BOD, COD, P-tot og i princip alle metaller. Disse bør derved i sin helhed findes i koncentratet. Derimod

udviser i princippet alle stoffer en lavere opkoncentreringsgrad end de forventede 20 gange, hvilket højst sandsynligt er et resultat af spild eller fejlhåndtering af prøver eller analyse unøjagtighed.

Det ses, at ammoniak frigives under inddampningsforsøget og følger med over til destillatet.

4.3 Inddampningsforsøg 2

I dette forsøg blev pH initialt sænket til lidt under 6 og pH blev løbende justeret ned til dette pH niveau under inddampningsforsøget.

Initialvolumen var 25 liter, ligesom i forsøg 1, men rejktvandet var nemmere at inddampe. Det var muligt at inddampe ned til en restvolumen på ca. 0,5 liter. Opkoncentreringsfaktoren bliver derved ca. 50 gange (eller ca. 98 % som destillat og ca. 2 % som koncentrat).

Også her er separeringen af alle stoffer i princippet meget god. Derimod er koncentrationsstigningen ikke i overensstemmelse med den forventede baseret på initial- og restvolumerne.

Ved at kontinuerligt at regulere pH niveaet til under 7 i inddamperen adskilles også ammonium godt. Desuden virker det nemmere at inddampe rejktvandet når pH-værdien regulres under inddampningen.

5. Konklusion

I princippet adskilles alle stoffer godt ved inddampning og alle stoffer, undtaget ammoniak, findes i koncentratet.

Ved at regulere pH i inddamperen under inddampningen kan man bestemme, hvor ammoniumkvælstoffet skal ende dvs. i koncentratet eller i destillatet.

Derimod er det svært at afgøre hvor høj opkoncentreringen af enkle stoffer bliver ud fra de foreliggende resultater af laboratorieforsøgene. Flere forsøg og flere analyser bør udføres for at verificere resultaterne og opstille bedre massebalancer.

På basis af de gennemførte laboratorieforsøg ser der ikke ud til at være nogle forhindringer i form af belægninger, tykt koncentrat, osv. for at inddampe rejktvandet.

Bilag 1; Testrapporter Inddampningsforsøg 1 og 2



Box 42057
126 13 Stockholm
Lev. Vretenborgsv. 3

Tel: 08-645 63 30
E-mail: info@vapotec.se

Kund	Kontaktperson	Datum	20140505
------	---------------	-------	----------

Envidan - Gafokir

Vätska	pH	lev. mängd	% i batch	liter i batch	kokpunkt	dens
Obehandlat vatten 0-prov (1/6)	7	50	50%	25		1

Filtrerat 0-prov (2/6)

Kaliumnitrat

Koncentrat (liter) (3/6)	konc. 1
totalt behandlad volym	25
restvolym	1
% konc, restvolym	4
densitet, koncentrat	-
pH	8
kokpunktförhöjning, grC	

Kondensat (4-6/6)	4	5	6
Färg	klar	klar	klar
Grumlighet	nej	nej	nej
Lukt	något	ja	ja
Vid koncentration %	0-30%	30-75%	75-96%
pH	8	9	9,3
Mängd kondensat vid provtagning	7,5	11	5

Observationer

Skumning	nej
Beläggning vid 90% koncentration	nej
Bottensats vid sedimentering	ja något slam

Allmänt:

pH-justerade från 7,3 ned till 6,3 före indunstning.
Enkel filtrering utfördes före indunstning
Indunstning med normalt förlopp och utan problem.
Första kondensatprov (nr 4/6) 7 liter. pH har stigit även i koncentrat
Andra kondensatprov (nr 5/6) 11 liter, pH ökar i både koncentrat och kondensat
Sista kondensatprov (nr 6/6) 5 liter, pH har ökat något
Ingen märkbar beläggning på värmeförande ytor

Sammanfattning:

Går att indunsta till <4%



Box 42057
126 13 Stockholm
Lev. Vretenborgsv. 3

Tel: 08-645 63 30
E-mail: info@vapotec.se

Kund	Kontaktperson	Datum
Envidan - Gafokir		20140505

Vätska	pH	lev. mängd	% i batch	liter i batch	kokpunkt	dens
Obehandlat vatten 0-prov (1/6)	7,3	50	54%	27		1

Filtrerat 0-prov (2/6)

Kaliumnitrat

Koncentrat (liter) (3/6)	konc. 1
totalt behandlad volym	27 liter
restvolym	0,5 liter
% konc, restvolym	2 %
densitet, koncentrat	-
pH	5,5-7 pH
kokpunktförhöjning, grC	

Kondensat (4-6/6)	4	5	6
Färg	klar	klar	klar
Grumlighet	nej	nej	nej
Lukt	något	något	något
Vid koncentration %	0-30%	30-75%	75-96%
pH	8,9	9	9,3
Mängd kondensat vid provtagning	6	6	6

Observationer

Skumning	nej
Beläggning vid 90% koncentration	nej
Bottensats vid sedimentering	nej

Allmänt:

pH-justerade från 7,3 ned till 6,0 före indunstning. 6 cl HCl
Enkel filtrering utfördes före indunstning
Indunstning med normalt förlopp och utan problem.
Första kondensatprov (nr 4/6) 7 liter. pH har stigit till 8,9 även i koncentrat, 7,3
justerade ned koncentrat till pH 5,6 med 2,4 cl HCl
Andra kondensatprov (inget prov uttaget) 6 liter, pH ökar till 7,3 i koncentrat och 8,9 i kondensat
justerade ned koncentrat med 1,2 cl, pH sjönk till 3,5. Tillsatte 1,5 liter obehandlat och pH steg till 5,8
tredje kondensatprov (2/6) 6 liter koncentrat 6,0 och kondensat 8,4
Tillsatte 4 ml HCl, och konc sjönk till 4,5. Tillsatte 0,5 liter obehandlat och koncentrat pH steg till 5,4.
Fjärdekondensatprov sista 6/6, pH 8,3 koncentrat 1 liter pH 5,5 sjunkande

Ingen märkbar beläggning på värmeförande ytor, ingen bottensats

Sammanfattning:

Går att indunsta till <4%

Bilag 2

Analyse af rejeckt vand i forbindelse med gennemførelse af udviklingsprojektet GAFOKIR er analyseret efter analysemetoderne beskrevet ved standarder i nedenstående tabel.

EUROFINS analysemetoder

Parameter	Metode
Suspenderet stof	DS/EN 872
Ammoniak + Ammonium-N filtreret	SM 17 udg. 4500
Total-N (off-line)	SM 17 udg. 4500
Total-P (off-line)	SM 17 udg. 4500
COD, kemisk iltforbrug	ISO 15705
Metaller i spildevand (7 stk.) iflg. MST (Pb, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn)	DS/EN ISO 17294m:2005
Miljøfremmede stoffer iflg. MST (DEHP, NPE, LAS, PAH)	GC/MS HPLC-FLD
E. Coli #	DS 2255
Enterokokker #	DS/EN ISO 7899-2
Salmonella #	DS 266

BIOFOS analysemetoder

Parameter	Metode
pH	ISO 10523:2008
Suspenderet stof	DS/EN 872:2005
Ammonium (NH ₄ -N) - filtreret	ISO 7150-1
Fosfat (PO ₄ -P) - filtreret	EN ISO 6878-1-1986
Total-N	EN ISO 11905-1
Total-P	EN ISO 6878-1-1986
COD, kemisk iltforbrug	ISO 15705 og ISO 6060-1989

Biofos Lynettefællesskabet A/S
Att. Dines Thornberg
Refshalevej 250
2300 København S

Brøndby, 21. april 2015

115-24529.01

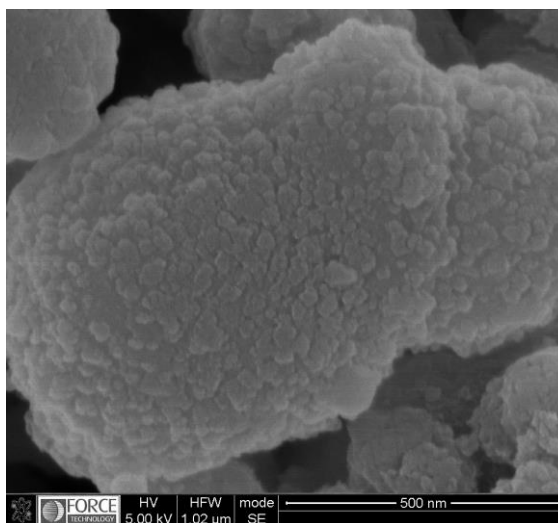
Side 1 af 5

1 bilag

TFP/mqs

RAPPORT

Bestemmelse af salte fra rejeftvand



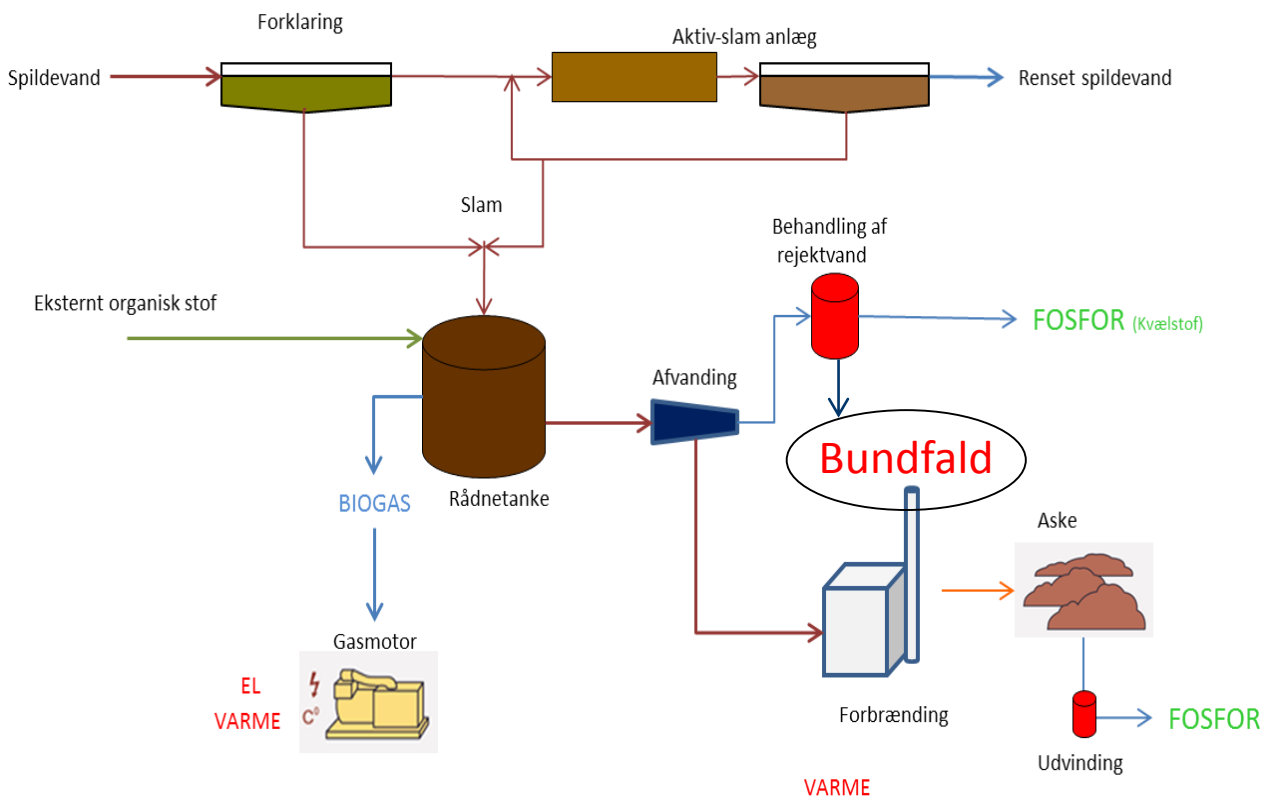
Rapporten er kun gyldig med to digitale signaturer fra FORCE Technology. Rapporten forefindes som original i FORCE Technologys database og sendes som elektronisk duplikat til kunden. Den hos FORCE Technology lagrede original har forrang som dokumentation for rapportens indhold og gyldighed.

Rapporten må kun gengives i uddrag med FORCE Technology's skriftlige tilladelse.
Prøvningsresultaterne gælder udelukkende for de prøvede emner.

De "Almindelige betingelser" på sidste side er en integreret del af vor ydelse.

1 Prøve- og opgavebeskrivelse

Fra Biofos har FORCE Technology den 24.3.2015 modtaget en prøve af slam, som er bundfald fra rejeckt-vand. Opsamlingspunktet i rensne processen er vist i Fig. 1.



Figur 1. Skematisk gengivelse af processen (fra kunden)

Der ønskes en analyse af bundfaldet samt, om muligt, en identificering af hvilke krystallinske faser der forekommer.

Biofos har lavet en analyse som er rapporteret pr e-mail som følger:

" Rekvisitionsnummer for jeres arbejde er 141094

EAN til BIOFOS er 5790002135569

Vi har målt et indhold af organisk stof som COD (kemisk iltforbrug med Dichromat) til 139 mg/g tørret bundfald. Altså ca. 14 % organisk stof i det tørrede.

Derudover 114 mg Tot-P/g tørret bundfald og mindre end 5 mg Tot-N/g tørret bundfald."

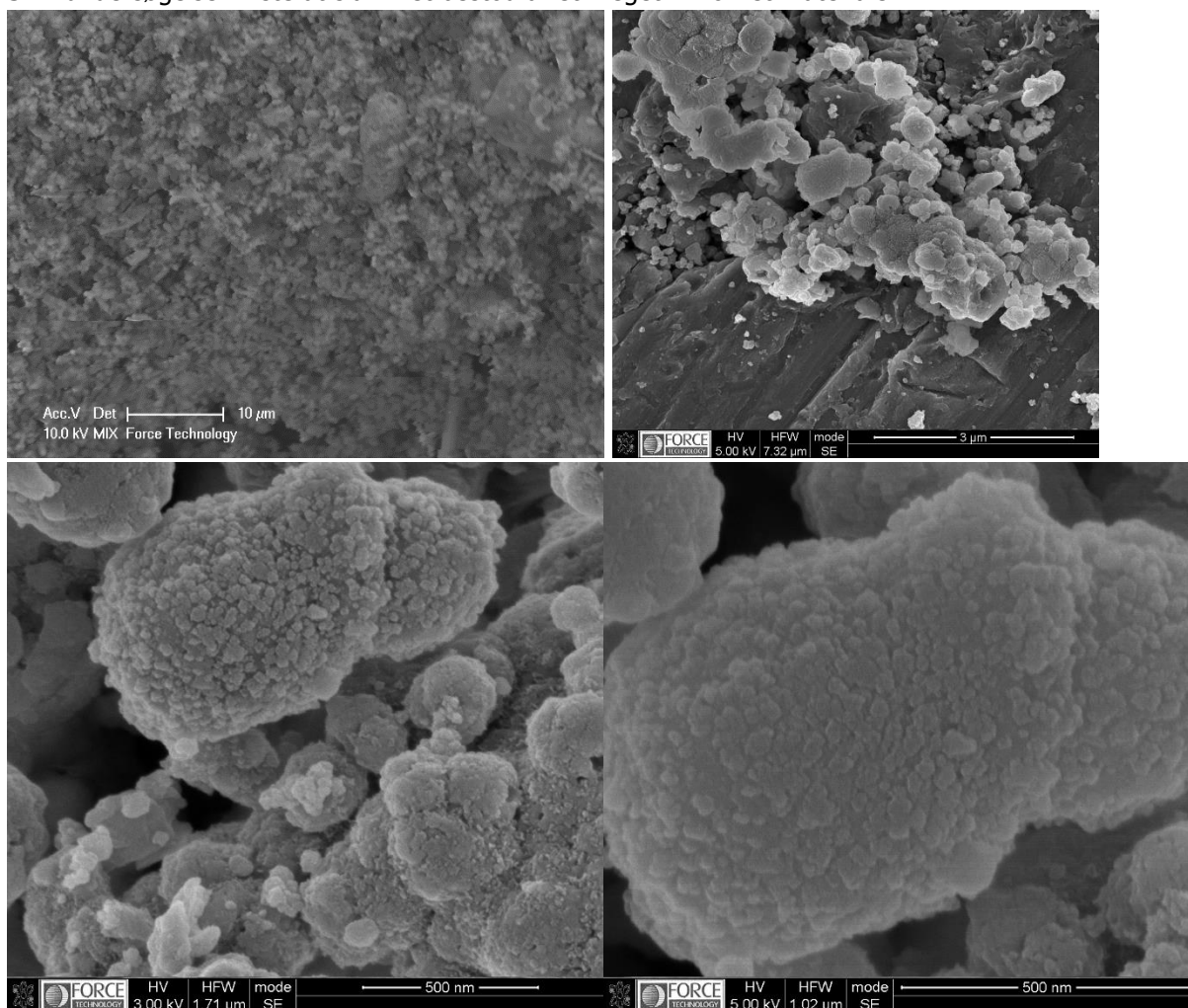
2 Undersøgelse

Efter pyrolyse af bundfaldet er det blevet analyseret i SEM (Scanning Electron Microscopy) ved hjælp af EDX (Energy Dispersive X-ray analysis). EDX er en semi-kvantitativ analysemetode, som kan analysere grundstoffer med atomnummer større end 5 med en detektionsgrænse omkring 0,1 vægt%. Præcisionen er som regel mindre god ved de lettere grundstoffer som C, N og O.

Der er desuden foretaget en røntgendiffraktions undersøgelse (XRD) af pulveret, for at bestemme hvilke krystalstrukturer der er tilstede. XRD analysen er foretaget med Cu-K α stråling.

3 Resultat

SEM undersøgelsen viste at slammet bestod af et meget finkornet materiale.



Figur 2. Nærbilleder af slampartiklerne. Partiklerne ser ud til at bestå af agglomerater af meget små krystallitter med en størrelse på 50-100 nm eller mindre.

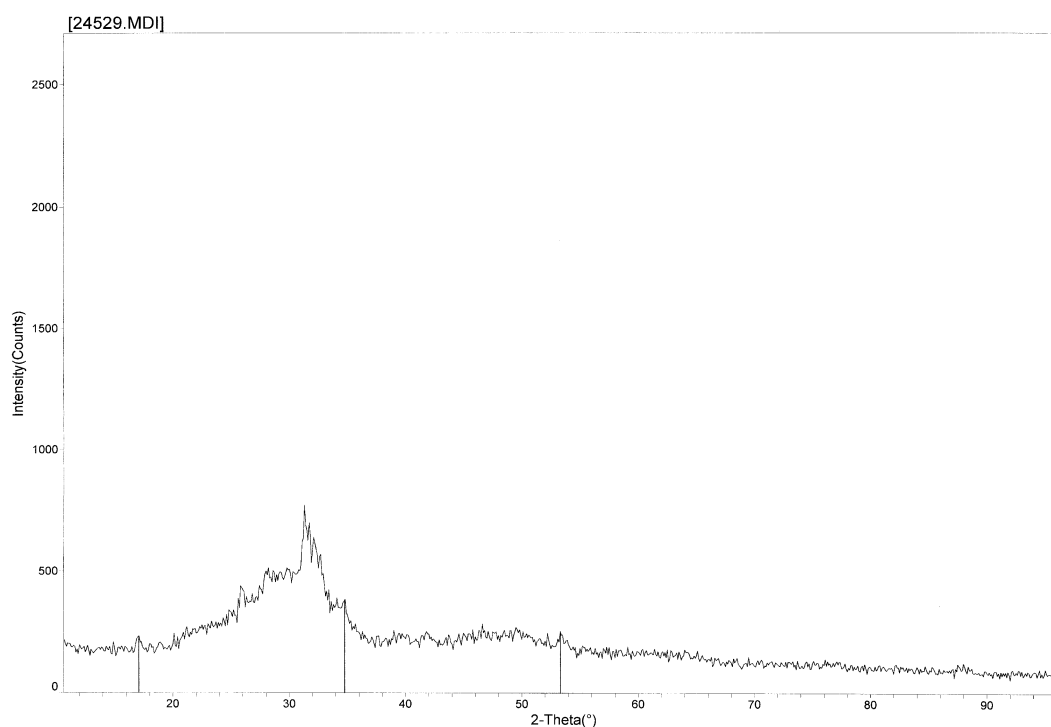
EDX analysen viste følgende sammensætning som et gennemsnit for adskillige partikler.

<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>C</i>	3.4	7.0
<i>O</i>	27.2	42.2
<i>Na</i>	0.7	0.8
<i>Mg</i>	6.8	7.0
<i>Si</i>	8.4	7.4
<i>P</i>	14.1	11.3
<i>Cl</i>	0.7	0.5
<i>K</i>	1.9	1.2
<i>Ca</i>	36.8	22.7

Dette kan sammenholdes med kundens analyse med anden metode, som viste 14 wt% organisk materiale (ilt), 11 wt% P og <0.5 wt% Na. Da EDX analysen er foretaget efter pyrolyse, er det C og O som er tilbage bundet som uorganisk materiale. De 27.2 % O i EDX analysen er altså ikke bundet organisk, men stammer fra mineraler. FORCE Technology har målt 14.1 % P i den pyrolyserede prøve, hvilket svarer til 11.9% i den tørrede prøve hvilket er sammenligneligt med de 11.4% målt af kunden.

Tørring og pyrolyse på FORCE Technology viste at materialet indeholdt 58.2% vand. Af tørstofindholdet forsvandt der 18.1% (vægt) organisk materiale ved pyrolysen, hvilket svarer meget godt til de 14% som blev målt af kunden.

XRD spektret er vist nedenfor i Fig. 3.



Figur 3. Røntgen-diffraktogram af det finkornede pulver efter pyrolyse.

Spektret i Fig. 3 er karakteristisk for et amorft (ikke-krystallinsk) materiale. Der ses meget få veldefinerede toppe i spektret. Meget finkornet materiale kan forårsage en forbredning af toppene i spektret, men selv ved en formodet korn-størrelse på 20 nm ville denne forbredning ikke være mere end 0.4° , så det anses ikke for sandsynligt at dette er årsagen, men snarere at materialet faktisk er amorft. Der er en antydning af en top mellem $2\theta=31^\circ$ og $2\theta=32^\circ$ samt en let forhøjet baggrund i området $2\theta=[40^\circ-55^\circ]$. Dette kan passe med en meget finkornet fase af kalciumfosfat (hydroxylapatit). Ud fra det foreliggende kan vi ikke udtale os kvantitativt om hvilke krystalfaser eller kemiske forbindelser der er til stede. Følgende kunne komme på tale: $MgPO_4$, $CaPO_4$, CaO , $CaCO_3$, talkum ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$), $NaCl$, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ (hydroxylapatit). Sidstnævnte materiale er en vigtig del af knogler. Det skal dog understreges, at vi ikke positivt har kunnet identificere nogen af disse faser, og at XRD analysen bedst passer med en amorf (ikke-krystallinsk) eller ekstremt finkornet materiale fase.

4 Sammenfatning

Kundens analyse af organisk indhold samt indhold af fosfor i slammaterialet er blevet bekræftet med EDX analyse. Herudover giver EDX og XRD indtryk af en amorf eller ekstremt finkornet krystal struktur, som indeholder Ca (38%), P (14.1%), Si (8.4%), Mg (6.8%) og K (1.9%) samt en lille smule NaCl (1.4 %). Disse mineraler forefindes højst sandsynligt som oxider og karbonater, da der efter pyrolyse stadig er 3.4% C og 27.2 % O tilstede. Præcis hvilke forbindelser der er tale om kan vi ikke bestemme, men mulige forbindelser er beskrevet i diskussionen ovenfor under resultater.

SEM undersøgelsen viste at materialet fremstod som relativt homogene samlinger af små korn med en størrelse < 50 nm. En krystalstørrelse, som kan forklare det amorfe indtryk fra XRD analysen, skal dog være væsentligt mindre (sikkert $< 5-10$ nm). Dette vil muligvis kunne afsløres ved en supplerende TEM undersøgelse.

Task ID: 115-24529

Vor ref:/Our ref:

JBM/PJ

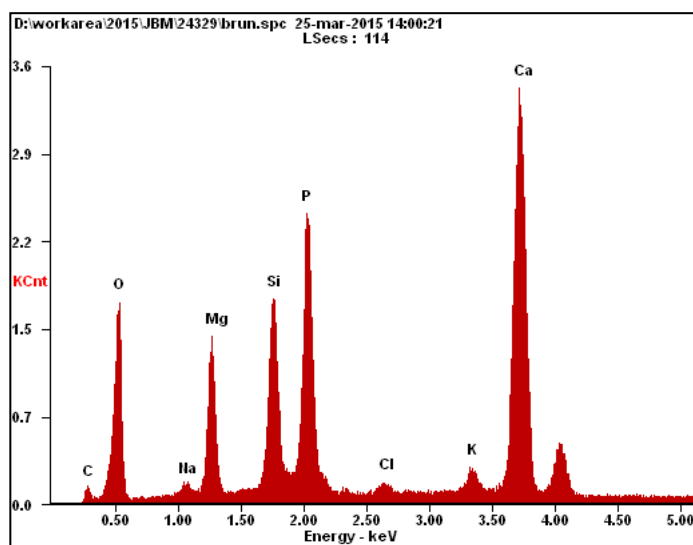


Kemi & Plast, Chemistry & Plastics

Emne / Sample ID

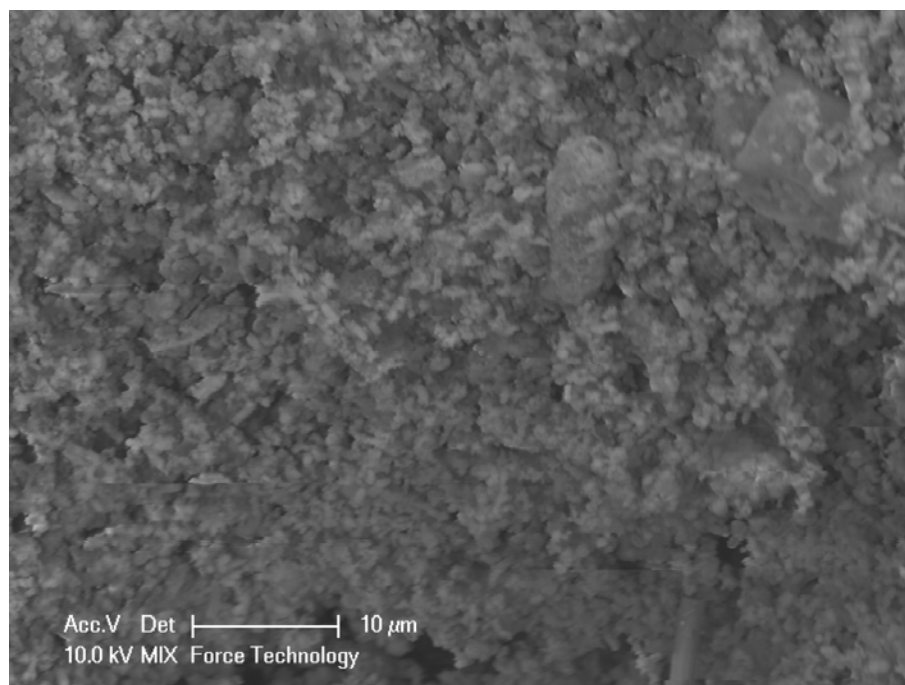
Brunt slam

21-Apr-2015



Element	Wt %	At %
C K	03.37	06.96
O K	27.20	42.15
NaK	00.72	00.78
MgK	06.82	06.96
SiK	08.38	07.40
P K	14.14	11.32
ClK	00.70	00.49
K K	01.90	01.21
CaK	36.75	22.73

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT



Den energidispersive røntgen analyse er en semikvantitativ grundstofbestemmelse. Resultaterne skal følgelig tages med dette forbehold.
The energy dispersive x-ray analysis is a semi quantitative elemental analysis, and this should be considered when the results are evaluated.

FORCE Technology - Almindelige betingelser

1. Aftale om løsning af opgaver

Før arbejdet påbegyndes, skal der være truffet skriftligt aftale vedrørende opgavens art og omfang, tidsplan og økonomi.

2. Ejendomsret og ophavsret

- 2.1. FORCE Technologys rapporter må kun offentliggøres i deres helhed og med kildeangivelse. Anvendelse af uddrag og i citatform må kun ske efter skriftlig aftale herom.
- 2.2. Rekvirenten må respektere FORCE Technologys forpligtelser i henhold til lov om arbejdstagers opfindelser.

3. Manglende opfyldelse af aftale

FORCE Technology kan ikke gøres ansvarlig for ikke at opfylde aftaler, helt eller delvist, såfremt dette skyldes begivenheder uden for FORCE Technologys indflydelse.

4. Garanti

- 4.1. FORCE Technology påtager sig at udbedre fejl, der skyldes mangel ved design, materiale eller udført arbejde.
- 4.2. Denne garanti begrænses til fejl, som opstår eller bliver afsløret inden 12 måneder fra leveringstidspunktet.
- 4.3. I tilfælde af brug af specielle komponenter vil garantiperioden for disse komponenter være den samme, som FORCE Technology er i stand til at opnå hos sine leverandører.
- 4.4. I tilfælde af reklamation skal kunden uden ophold tilskrive FORCE Technology om opstået fejl. Ved modtagelsen af en reklamation kan FORCE Technology, hvis fejlen er omfattet af disse bestemmelser, vælge
 - a) at reparere den fejlbehæftede del eller udstyr på stedet, eller
 - b) at få den fejlbehæftede del eller udstyr returneret til FORCE Technology for reparation, eller
 - c) at udskifte den fejlbehæftede del eller udstyr, således at kunden selv kan udføre den nødvendige reparation for FORCE Technologys regning.
- 4.5. I det tilfælde, hvor FORCE Technology har modtaget en fejlbehæftet del eller udstyr til erstatning eller reparation, skal kunden afholde transportomkostninger samt bære risikoen ved transport.
- 4.6. Fejlbehæftede dele eller udstyr, som er erstattet ifølge disse bestemmelser, skal stilles til FORCE Technologys disposition.
- 4.7. FORCE Technologys ansvar er begrænset til fejl, som opstår under forsvarlig benyttelse. FORCE Technology hæfter ikke for fejl som følge af forkert installation og vedligeholdelse samt reparation udført af andre end FORCE Technologys personale eller agent, eller ændringer udført uden FORCE Technologys skriftlige godkendelse. FORCE Technology hæfter ikke for fejl, der skyldes normalt slid.
- 4.8. Garantiperioden for reservedele og tilbehør er den samme som for den udskiftede del.

5. Ansvar

- 5.1. FORCE Technology er ikke erstatningsansvarlig for tab eller skade, medmindre det kan dokumenteres, at tabet eller skaden er opstået på grund af fejl eller forsømmelse begået af FORCE Technology i forbindelse med produktion eller udførelsen af en rekvireret opgave.
- 5.2. FORCE Technology hæfter ikke for driftstab, tidstab, avancetab eller lignende indirekte tab.
- 5.3. FORCE Technology løser rekvirerede opgaver og fremkommer med udtalelser og vejledninger på grundlag af den viden og teknik, FORCE Technology råder over. FORCE Technology påtager sig ikke erstatningsansvar, medmindre det kan bevises, at denne viden eller teknik var mangelfuld på tidspunktet for opgavens løsning.
- 5.4. FORCE Technology fralægger sig erstatningsansvar for skader, som måtte indtræffe i forbindelse med en anvendelse af afgivne data og prøvningsresultater, som ligger uden for den opgave og uden for det formål, i forbindelse med hvilke FORCE Technologys udtalelse er afgivet.
- 5.5. FORCE Technology fralægger sig erstatningsansvar for fejl i forbindelse med udtalelser, for hvilke det er anført, at disse hviler på en skønsmæssig vurdering.
- 5.6. Ved udøvelse af kontrol og prøvning hæfter FORCE Technology kun for skader, som måtte opstå ved, at FORCE Technology ikke rettidigt har gjort rekvirenten opmærksom på tilstedeværende mangler.
- 5.7. FORCE Technology har intet erstatningsansvar for indtrufne skader, såfremt en skade skyldes en egenskab ved et produkt eller en anvendelse af et produkt, som enten ikke er afprøvet eller undersøgt og beskrevet i prøvnings- eller undersøgelsesrapporten, eller som afviger fra FORCE Technologys beskrivelse i prøvnings- eller undersøgelsesrapporten af produktens egenskab eller af en mulig produktanvendelse.
- 5.8. FORCE Technology har intet erstatningsansvar for indtrufne skader, såfremt et skadevoldende produkt ikke konkret har været afprøvet af FORCE Technology, medmindre rekvirenten godtgør, at det skadevoldende produkt er identisk med et af FORCE Technology konkret afprøvet og kontrolleret produkt.
- 5.9. Hvis andre end rekvirenten rejser krav om erstatning mod FORCE Technology begrundet i forhold, der ligger ud over det erstatningsansvar, som FORCE Technology i henhold til punkt 5.1. - 5.8. har påtaget sig, er rekvirenten pligtig til at overtage sagens førelse og skadesløsholde FORCE Technology for alle omkostninger, herunder sagsomkostninger og erstatningsbeløb.

6. Tvister

Såfremt der opstår tvist mellem rekvirenten og FORCE Technology i forbindelse med udførelsen af en opgave eller fortolkning af aftalen, skal tvisten, såfremt den ikke kan løses ved forhandling mellem parterne, afgøres af Det Danske Voldgiftsinstitut på grundlag af dansk ret.

FORCE Technology - General Conditions

1. Agreement

Prior to commencing work, agreement on type and scope as well as timetable and economy shall be made in writing.

2. Ownership and copyright

- 2.1. Reports made by FORCE Technology shall only be published in full and with source reference. Extracts shall only be quoted upon prior permission in writing.
- 2.2. The client shall observe FORCE Technology's obligations in accordance with the Danish employees' inventions act.

3. Non-fulfilment of agreement

FORCE Technology shall neither in whole nor in part be liable for any non-fulfilled agreements owing to events beyond the influence of FORCE Technology.

4. Warranty

- 4.1. Subject as hereinafter set out, FORCE Technology shall undertake to remedy any defects resulting from faulty design, materials or workmanship.
- 4.2. This liability is limited to defects which occur or are discovered within twelve (12) months from the time of delivery.
- 4.3. In respect of special components the warranty period will be the same as the warranty period which FORCE Technology is able to obtain from their suppliers.
- 4.4. In the event that the client wishes to submit a claim under the warranty he shall without delay notify FORCE Technology in writing of any defect that has arisen. On receipt of such notification FORCE Technology shall if the defect is one that is covered by this clause at their option:
 - a) repair the defective Goods or parts in situ; or
 - b) have the defective Goods or parts returned for repair; or
 - c) replace the defective Goods or parts in order to enable the client to carry out the necessary repairs at the expense of FORCE Technology.
- 4.5. In the event that FORCE Technology has received defective Goods for replacement or repair, the client shall bear the costs of transport and risk of damage.
- 4.6. Defective Goods or parts replaced in accordance with these provisions shall be made available to FORCE Technology.
- 4.7. The liability of FORCE Technology shall apply only to defects that occur under proper use. In particular it does not cover defects arising from faulty installation and maintenance or repairs carried out by individuals other than FORCE Technology's personnel or their agent, or alterations carried out without the consent in writing by FORCE Technology; nor does it cover normal wear and tear.
- 4.8. The warranty period in respect to spare parts and accessories shall operate in the same manner as the warranty period for the replaced part itself.

5. Liability

- 5.1. FORCE Technology shall only be liable for loss or damage if it is proved that the loss or damage is due to errors or negligence of FORCE Technology in connection with production or performance of a task.
- 5.2. FORCE Technology shall not be liable for any consequential loss, such as but not limited to loss of time or loss of profits.
- 5.3. Tasks are solved and opinions and guidance are given by FORCE Technology on the basis of the knowledge and technology available to FORCE Technology. FORCE Technology shall only be liable if it is proved that this knowledge or technology were faulty at the time of the completion of the task.
- 5.4. FORCE Technology shall not accept liability for loss or damage that may occur in connection with the client's use of provided data or test results which lies outside the scope of the task and purpose in connection with which FORCE Technology's opinion has been given.
- 5.5. FORCE Technology shall not accept liability for errors in connection with opinions given regarding which it has been stated that they are based on an estimate.
- 5.6. When performing verification and testing, FORCE Technology shall only be liable for damage which might occur owing to FORCE Technology's failure to notify the client, in time, of existing defects.
- 5.7. FORCE Technology shall not be liable for damage occurring if such damage is due to a property of a product or an application of a product which has either not been tested or examined and described in the testing or examination report, or which differs from FORCE Technology's description in the testing or examination report of the property of the product or of a possible application of the product.
- 5.8. FORCE Technology shall not accept liability for damage occurred if a product causing damage has not actually been tested by FORCE Technology, unless the client proves that the product is identical with a product actually tested and verified by FORCE Technology.
- 5.9. If a third party claims damages from FORCE Technology on grounds which lie beyond the liability to pay damages undertaken by FORCE Technology in accordance with clauses 5.1 to 5.8, the client shall be under an obligation to take over the conducting of the case and indemnify and hold harmless FORCE Technology for all costs and damages.

6. Disputes

Any dispute between the client and FORCE Technology arising out of or in connection with the performance of a task or the interpretation of the agreement shall if such dispute cannot be solved through negotiation between the parties be settled by Copenhagen Arbitration in accordance with Danish law.

Den Danske Akkrediterings- og Metrologifond (DANAK)

DANAK akkrediterede ydelser leveres i henhold til Erhvervsfremme Styrelsens Bekendtgørelse om akkreditering af laboratorier til teknisk prøvning m.v., henholdsvis Sikkerhedsstyrelsens Bekendtgørelse om akkreditering af virksomheder til certificering af personer, produkter og systemer, samt til inspektion. De respektive standarder i DS/EN 45000 serien og EN ISO/IEC 17000 serien samt relevante ISO/IEC Guider er en del af akkrediterings-vilkårene. DANAK specificke krav til kalibreringscertifikaters indhold medfører bl.a. en bedømmelse af laboratoriets måleevne og dets sporbarhed til nationale normaler.

The Danish Accreditation and Metrology Fund (DANAK)

All DANAK accredited services are supplied in accordance with the National Agency of Industry and Trade's statutory Accreditation of laboratories for technical testing etc. respectively The Technical Safety Council statutory of Accreditation of organisations for certification of personnel, products and systems, and for inspection. The respective standards in the DS/EN 45000 series, the EN ISO/IEC 17000 series and the relevant ISO/IEC Guides are part of the conditions for accreditation. The DANAK specific demands to the content of calibration certificates imply an assessment of the measurement capability of the laboratory and its traceability to recognised national standards.

Bilag 4

Nutidsværdiberegning

Business Case Gafokir		Tallene udtrykker ændringen i.f.t. uændret drift											
Nutidsværdiberegning		RA											
Alternativ 1 el opvarmet anlæg		330 m3/rejektvand/dag											
Version gemt		23-okt											
t.kr.	Nutids-værdi	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	4%
Projektår		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Udgifter													
Investering													
Inddampningsanlæg		-10.400	-10.400										
Filter, syrelager, buffertank & lagertank		-400	-400										
SRO & tilslutninger		-700	-700										
Investering i alt		-11.500	-11.500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Drift													
Personale		-811	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
El		-33.412	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119	-4.119
Syre		-11.723	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445	-1.445
Besparelser i hovedstrømmen (el, FeCl, slam mm)		12.286	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515
Andet		0											
Drift		-33.661	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150	-4.150
Indtægter													
Gødningsværdi P grundscenarie		3.257	402	402	402	402	402	402	402	402	402	402	402
Gødningsværdi N grundscenarie		9.437	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163	1.163
Udgift til udbringning af koncentrat grundscenarie		-12.693	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565	-1.565
Nettoindtægt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grundscenarie													
Nutidsværdi		-45.161											
Kr/kg N+P fjernet		-26											

GAFOKIR
GAFOKIR

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet ” Genanvendelse af Fosfor og Kvælstof ved inddampning af rejeftvand”, der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriet , 2014.

Overskydende vand fra afvanding af udrådnat spildevandsslam (rejeftvand) indeholder en del fosfor og kvælstof, der har et genbrugspotentiale som gødning.

Rejeftvandet er i sig selv for tyndt til at blive anvendt som gødning med i en mere koncentreret form kunne det anvendes som flydende gødning.

Forsøg med et pilotanlæg på Renseanlæg Avedøre har vist at det er teknisk muligt at inddampe rejeftvandet 30 gange.