

Bilag 3 - Fosforgenvindingsteknologi katalog

I et litteraturstudie foretaget af projektgruppen er en række fosforgenvindingsteknologier blevet beskrevet og undersøgt på en række udvalgte parametre. Teknologierne er udvalgt til at dække forskellige TRL-niveauer, anlægsplaceringer, anlægstyper samt udvindingsmetoder. Der er inddraget slambehandlingsmetoder, fældningsmetoder og adsorption. Kataloget skal anvendes som et opslagsværk for inspiration og er ikke detaljeret nok som beslutningsværktøj ved investering, dette kræver et dybere studie med baggrund og kendskabet til det relevante renseanlæg. Kataloget giver en oversigt over forskellige teknologier og deres udviklingsstadiet.

Fosforgenvindingsteknologierne er vurderet på investering samt drift omkostninger i kataloget. Da investeringsomkostninger er meget afhængigt af størrelse samt kompleksiteten af investeringen, er det ikke prissat, men beskrevet hvilke udgifter der skal tages forhold for. Derudover er flere af teknologierne ikke fuldt kommercialiseret og dermed kendes størrelsen af investeringen ikke endnu. Projektgruppen har beskrevet udgifter der kan indgå i en konkret business case af hver teknologi, før en investering.

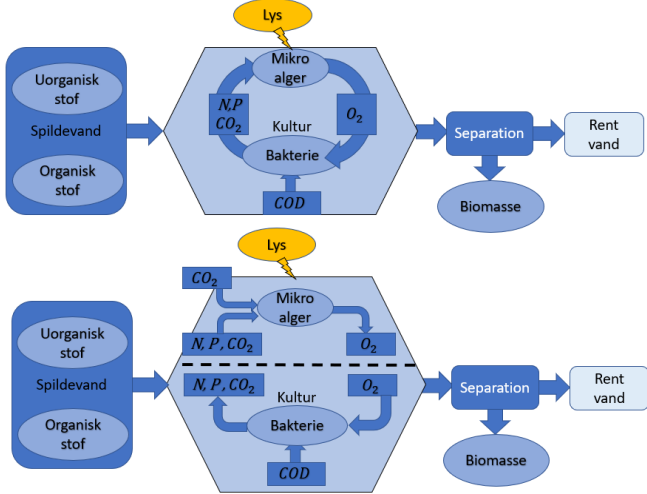
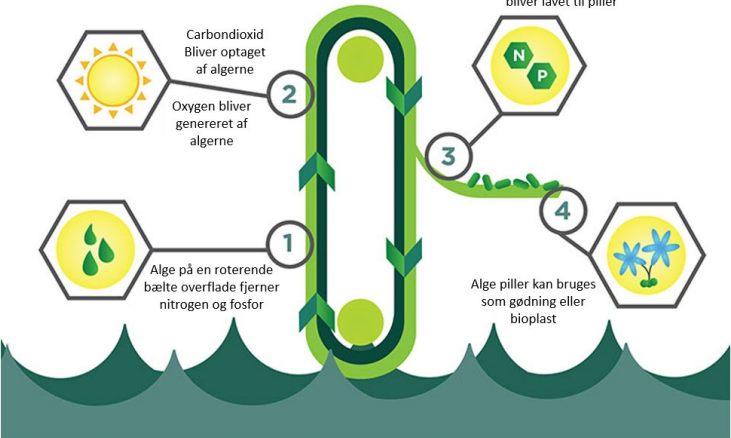
Effektivitetsprocenten af genindvindingssteknologierne er oplyst fra producenten. Procenten er en værdi for hvor meget af Total P, som indvindes fra spildevandet til et fosforholdigt produkt med slam på landbrugsjord, 0% indvinding, som reference. Sammenligningen ønskes at foretages som alternativ til at anvende slam på landbrugsjord, og få et mere højværdi produkt. Dermed har projektgruppen noteret 0% effektivitet ved "slam på landbrugsjord".

Projektgruppen har valgt TRL skalaen anvendt af HORIZON 2020. (HORIZON 2020)

- TRL 1 – basic principles observed
- TRL 2 – technology concept formulated
- TRL 3 – experimental proof of concept
- TRL 4 – technology validated in lab
- TRL 5 – technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 7 – system prototype demonstration in operational environment
- TRL 8 – system complete and qualified
- TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)

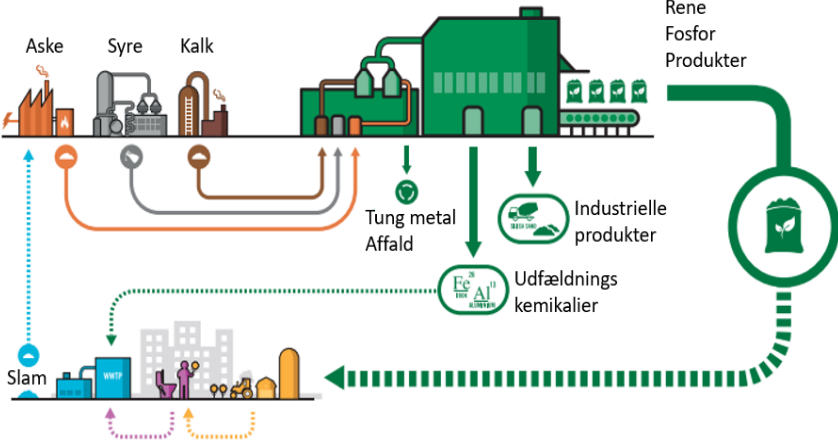
Projektgruppen har udvalgt fosforgenvindingsteknologierne beskrevet i dette katalog. For yderligere interesse anbefales det at undersøge "European Sustainable Phosphorus Platform", som samler information omkring genindvinding af fosfor i Europa, både teknologier samt lovgivning.

Kommercielt navn	Slam på landbrugsjord
Produktnavn	De naturlige fosforforbindelser der findes i slammet
Kemisk beskrivelse	Slammet indeholder hovedsageligt C, N og P. Samt andre uorganiske materialer så som tungmetaller. Resultaterne i arbejdsmappe 1 som er specificeret i bilag 2, viser at det afvandede slam har et relativt højt indhold af calcium og jern. Fosfor er efter anaerob udrådning som uorganisk fosfat.
Beskrivelse	<p>I den biologiske proces bundfældes slam sammen med fosfor, enten via biologisk fosforfjernelse eller via tilsætning af kemi. Slammet føres derefter videre til afvanding og/eller hygiejniserings. Det afvandede slam gradueres på baggrund af indholdet af miljøfremmede stoffer som A- B- eller C-slam, og prisen for bortskaffelse og anvendelse afsættes derefter, hvor A-slam er det rene og dermed det billigste.</p> <p>En af udfordringerne for slam på landbrugsjord er mængden af tungmetaller, som gør at slammet får en lavere kvalitet og dermed bliver afskaffelsen dyrere for forsyningen.</p>
Anlægsplacering	Udnyttelse af slamproduktet både fra anlæg med og uden anaerob nedbrydning.
Effektivitet	<p>Eksempel fra Esbjerg Vest: Seneste slamanalyse viser 52.000 mg/kg TS. I året 2020 er der afleveret 1412 ton TS (altså 73,42 ton fosfor). Anlægget modtog 74,4 ton fosfor. Altså en udvindingsgrad på ~98%.</p> <p>I denne sammenligning vil udvindingsgraden være 0% da vi ikke får et alternativt fosforindvindingsprodukt end slam. Sammenligningen er som alternativer til slam på landbrugsjord.</p> <p>OBS. Slamanalyser udføres kun halvårligt og varierer fra 50 g/t TS til 64 g/t TS.</p>
Omkostninger	For biologisk fosforfjernelse er både CAPEX og OPEX suveræn fordelagtig, hvis driften af et anlæg fordrer gode vækstvilkår for Bio-P-bakterierne. Udover det så skal der anvendes afvandingsmaskiner, som har forskellige CAPEX og OPEX potentialer. Hvis der skal anvendes kemi til fosforfjernelse, så vil det have en stor negativ indflydelse på både CAPEX og OPEX.
Teknologisk udviklingsniveau	Løsning er fuldt implementeret og anvendes allerede i vid udstrækning. TRL er dermed 9.
Afsætningsmuligheder	Det afvandede slam afsættes som udgangspunkt som gødning til landbrugsjord. Hvis slammet er forurenet, bliver det dog typisk forbrændt eller kompostet. Andre EU-lande har restriktioner til anvendelse af spildevandsslam på landbrugsjord.

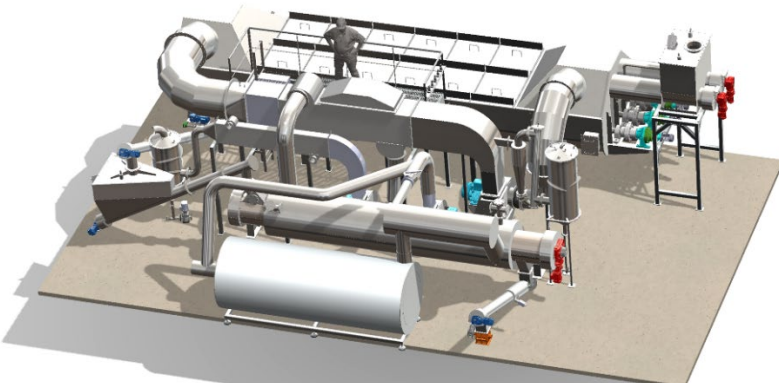
<p>Kommercielt navn</p>	<p>Revolving Algal Biofilm – (RAB)</p>
<p>Produktnavn</p>	<p>Alger</p>
<p>Kemisk beskrivelse</p>	<p>Anvendelse af alger til rensning af spildevand har været nævnt siden 1960'erne. P er lagret primært som polyfosfat i algeceller. Alger optager naturligt fosfor og kvælstof ifm. fotosyntesen hvilket gør teknologien til en teknologi med et naturligt biologisk princip.</p>  <p>(Gabriel Acién, et al. 2016)</p>
<p>Beskrivelse</p>	 <p>(Gross-Wen Technologies 2022)</p> <p>Det nye roterende alge biofilm (RAB) system bruger lodrette fremføringsbånd hvilket fungerer som grobund til alger. Algerne kommer i kontakt med spildevandet som giver næringsstoffer, sammen med CO₂ fra atmosfære og solskin kommer der mulighed for vækst. Alger høstes direkte fra båndet og derefter laves om til piller, som kan bruges direkte på markerne som gødning.</p> <p>På biofilmen vokser en kombination af alger og bakterier i en synergi som rensar samt optager næringsstoffer fra spildevandet. Som vist på illustrationen. En udfordring er at slam kan sætte sig på de roterende biofilmsbånd og hæmme algernes vækst.</p>
<p>Anlægsplacering</p>	<p>Den optimale placering er strømme med relative høje næringsstokoncentrationer men med lav suspenderet slam (ss)</p>

	koncentration. Dog kræver teknologien en opholdstid på flere dage, men der forsøges at optimere opholdstiden.
Effektivitet	Effektiviteten af teknologien er i området 60 til 90% Total-P fjernelse og op til 100% ortho-P fjernelse (Zhao et al., 143 (2018))
Omkostninger	Teknologien er patenteret men ikke endnu bredt udbredt. Teknologien kræver en investering, men driftsomkostninger er lave. Der er lavt energiforbrug og ingen udgifter til kemikalier.
Teknologiskudviklingsniveau Fordele og ulemper	TRL 7, teknologien er testet på forskellige typer renseanlæg. (chawaga 2017) Fordelene er det positive CO ₂ regnskab. Man kan kombinere teknologien med eventuelt CO ₂ fra biogasproduktion. En af de store udfordringer for at implementere teknologien er også nødvendigheden for en meget høj opholdstid. Ulemper er afhængigheden af solskin og temperatur for optimal drift, som gør at implementering er mest relevant i anlæg nær ækvator.
Afsætningsmuligheder	Algerne har en række værdifulde afsætningsmuligheder. Det kan anvendes som et biogødningssubstrat, derudover er der potentiale for bioplast, biobrændstof, lægemidler, farvestoffer og andre biobaseret materialer. Det kan også anvendes som biomasse i biogasreaktorer. (Fore 2020)

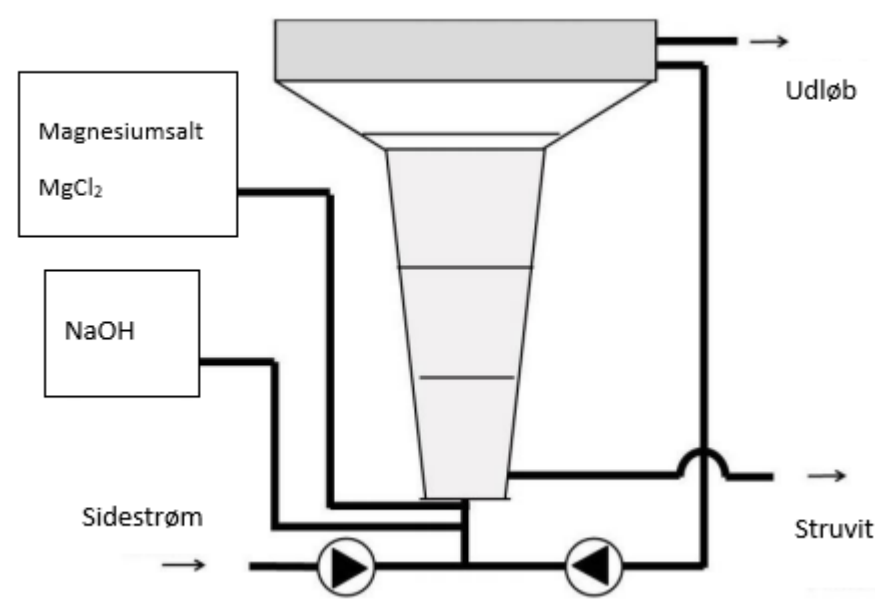
Kommercielt navn	ash2Phos Firmanavn: Easy mining som er ejet af Regn- Sells
Produktnavn	Precipitated Calcium Phosphate (PCP) fra aske
Kemisk beskrivelse	Produktet Precipitated Calcium Phosphate (PCP) er som calciumfosfat i form af apatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ med spor af metaller dvs. en kemisk veldefineret forbindelse med et højt indhold af fosfor. I de udvalgte analyserede anlæg i arbejdsplanen 1 og 3, blev der ikke fundet betydelige mængder apatit. Dog viste analyserne af slammasken fra Avedøre Biofos et indhold af calciumfosfatforbindelser på 83% af total-P. Se hovedrapport figur 4.
Beskrivelse	Aske fra slam har en høj koncentration af fosfor (7-10%), jern (10-15%) og aluminium (5-10%), men slammet indeholder også uønsket tungmetaller f.eks. cadmium. (Easy mining 2022) Ash2Phos består hovedsageligt af 3 trin. Første trin er opløsning af slammasken med syre, derefter separeres fosfor ved tilsætning af calcium, samt fældningsmetaller til 3 produkter. Produkterne er PCP samt Fe-forbindelse og Al-forbindelse. PCP produktet kan anvendes direkte eller videre behandles til det ønskede slutprodukt afhængig af anvendelse.

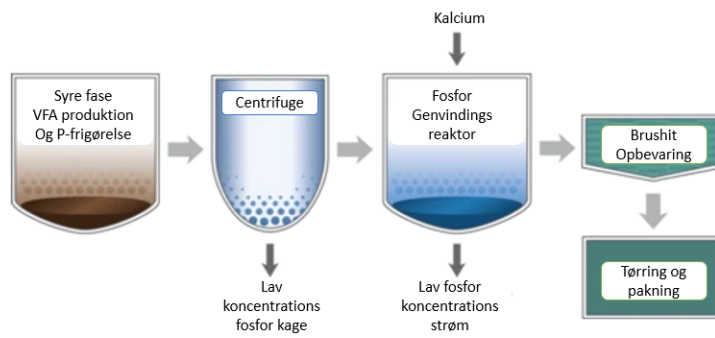
	 <p>(Easy mining 2022)</p>
Anlægsplacering	Teknologien er kun anvendelig på anlæg hvor slam forbrændes til aske.
Effektivitet	Udvindingsgrad: fosfor ≈90-95%, Aluminium ≈60-80%, jern ≈10-20% (Easy mining 2022)
Omkostninger	Det er ikke endnu kommerialiseret og investeringen er derfor ikke kendt, men den vurderes stor. Det skal centraliseres for at være økonomisk favorabelt, udgift til transport og oplagring. Udgifter på renseanlæg er lave da det håndteres eksternt. Udgifter til kemikalier skal tages med i betragtning.
Teknologiskudviklingsniveau Fordele og ulemper	Fosforindvinding fra slamaske er vurderet til TRL niveau 8. EasyMining er ved at bygge det første fuld-skala projekt i Tyskland. Anlægget kan håndtere 30.000 ton aske om året. (EasyMining 2021) Der er også planlagt et fuldskalaanlæg i Sverige. I vores europæiske nabolande anvendes forbrænding af slam i stor stil og teknologien vil være favorabel hvis efterspørgslen på slutprodukterne bliver mere favorabel end den er i dag. Fordelen kan være at slamasken fra forbrændinger i et område som eksempelvis Danmark kan behandles samlet til stordrift.
Afsætningsmuligheder	PCP kan bruges direkte som gødning, men er et "slow release gødningsprodukt". Produktet skulle være så rent at yderligere behandling af PCP, er muligt at lave til fosforsyre eller monoammoniumfosfat (MAP). PCP kan også anvendes som dyrefoder fosforsubstrat. Test har vist at produktet har samme opløselighed i citronsyre som monocalciumfosfat som anvendes som fosforsubstrat til foderblanding.

Kommercielt navn	Pyrolyse
Firmanavn	Aquagreen
Produktnavn	Biochar/biokoks
Kemisk beskrivelse	Stabiliseret kul og fosfor
Beskrivelse	Slam med TS mellem 15-25% er tørret i omgivelser med højtemperatur damp indtil TS er >95%. Derefter det tørrede slam varmet op til 650° C i iltfri område hvor organiske forureninger er fjernet via pyrolyse. Gas som er produceret under pyrolyse processen kan eventuelt blive brugt til proces eller fjernvarme.

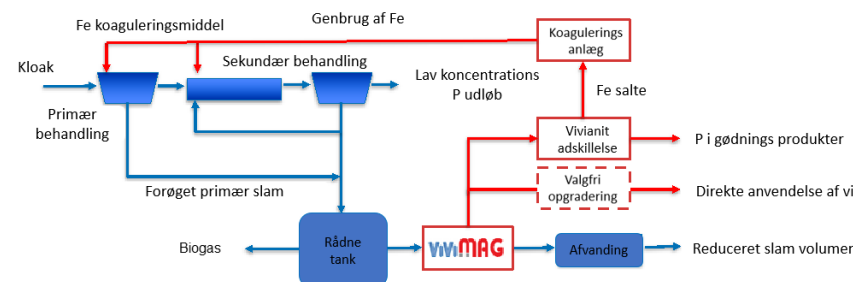
	<p>Der er flere kommercialiserede pyrolyseanlæg, hvor forskellene hovedsageligt er mekaniske ændringer og temperaturen for pyrolysen.</p> 
Anlægsplacering	<i>Efter afvanding af slam.</i>
Effektivitet	Ingen valide data fra fuldskaalanlæg er tilgængelige endnu. Teoretisk vil effektiviteten være 80-95 % fosfor.
Omkostninger	Investeringsomkostninger og driftsomkostninger er ikke endnu realiseret. 2 fuldskaalanlæg er ved at blive implementeret i Danmark. Videre optimeringer af anlægget vil forekomme for at optimere OPEX og CAPEX. Der vurderes en relativ stor investering. Anlægget er selvforsynende på energi.
Teknologiskudviklingsniveau Fordele og ulemper	Vurderet til 8 Fordele er at samt fosfor genindvinding kan man lagre kulstof. Der er også reduktion i mikroplast, medicinrester og nogle tungmetaller. P tilgængelighed er afhængig af Pyrolyse temperatur, og biokoks lavet med temperaturer under 600° C er mere tilgængelig til planter (Glaser 2019)
Afsætningsmuligheder	Kan lagres og spredes direkte på markerne eller anvendes som filtermateriale. Der arbejdes også i at omdanne biocharen til aktivkul. Det forventes at produktet vil have en økonomisk værdi.

Kommercielt navn	OSTARA PEARL
Produktnavn	Struvit
Kemisk beskrivelse	Struvit er et magnesiumfosfatmineral, $MgNH_4PO_4 \cdot 6 H_2O$. Mg:N:P molforholdet er 1:1:1 i krystallerne. Udfældning af struvit er som alle andre mineraler afhængig af koncentrationen af opløste reaktive ioner og pH. Opløseligheden af struvit krystaller er lavest ved en pH-værdi på 10. Uønsket udfældning observeres i rør, pumper og andre installationer på flere renseanlæg.
Beskrivelse	OSTARA PEARL er en fældningsteknologi anvendt på fosfat samt ammonium rige sidestrømme. I et almindeligt EBPR-anlæg vil den begrænsende faktor for udvinding af struvit være koncentrationen af magnesium. For at fremme krystalliseringen af struvit tilsættes magnesiumsalte, og fosfat bliver den begrænsende faktor. pH justeres med natriumhydroxid for optimal udfældning ved pH 8,5-9. Fosforrig strøm og magnesiumsalt tilføres i en "fluidised bed reactor", dannede struvit genindvindes, vaskes og tørres før de anvendes som kommercielt gødningsprodukt.

	<p>Udfældning af struvit som genindvindingsmetode for fosfor samt kvælstof er førende i branchen. Der udvikles en del på princippet hvilket har medført at det overordnede princip er udbredt under en række kommercielle navne og kommercielle udbydere. Forskellen kan findes i metoden at kontrollere pH samt valg af mixing. pH reguleres i nogle processer ved at strippe CO₂, for at undgå anvendelse af kemikalier.</p> <p>Under kommercielle navne kan nævnes: STRUVIA, phosphoGREEN, ANPHOS, NuReSys.</p>  <p>(Ghosh 2016)</p>
Anlægsplacering	Teknologiens optimale placering er i sidestrømme på EBPR-anlæg med anaerobe udrådningstanke.
Effektivitet	OSTARA PEARL har en effektivitet op til 50% af total P tilført anlægget, angivet fra leverandøren. (OSTARA 2022) Effektiviteten er afhængig af en effektiv bio-p, som kan være problematisk at opretholde.
Omkostninger	Implementering er en relativ stor investering og er derfor afhængig af en vis størrelse på anlægget. Derudover er der driftsomkostninger til pH justering, strøm og magnesiumsalte.
Teknologiskudviklingsniveau u Fordele og ulemper	Teknologien er bredt implementeret på fuldskalaanlæg verden over samt anvendelsen af struvit som gødningsprodukt. TRL-niveau er på 9.
Afsætningsmuligheder	Den producerede struvit anvendes i dag som et kommercielt produkt under navnet Crystal Green. (OSTARA 2022) En af fordelene ved anvendelse af struvit som gødningsprodukt er kombinationen af udvundet fosfor og udvundet kvælstof. Produktet er tilladt som gødningsprodukt jf. EU-regler.

Kommercielt navn	CalPrex
Produktnavn	Brushit
Kemisk beskrivelse	Brushit er en calciumfosfat krystal, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Brushit dannes fra reaktive fosfationer samt calciumioner i et let surt pH område, 4,5-6,5. Ca:P molforholdet i brushit ligger på 1.
Beskrivelse	<p>CalPrex er en fældningsteknologi anvendt i let sure strømme (pH 5-6). Grundet den let sure pH er teknologien ideel i en Two-stage anaerob nedbrydning hvor biogasprocessen er adskilt i et syretrin/fermenteringstrin og et biogastrin.</p> <p>En fermenterings tank med lav opholdstid (12-36 timer) ved iltfrie forhold øger en hurtig frigivelse af orthophosphat fra sekundær/aktiv slam der indeholder fosfor, optaget biologisk i bakterier, samt opløser krystalliseret og organisk bundet fosfor. Praktisk separeres det fosforrige output i en fosforfattig slamstrøm og i en fosforrig sidestrøm som tilsættes calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Det udfældede brushit sedimenteres og kan anvendes direkte som gødningsprodukt eller opkoncentreres for et højere fosforkoncentration.</p> <p>Pilotforsøg har vist udfordringer med suspenderet stof i brushit sedimentet, for et renere produkt kræves en yderligere opkoncentrering. (Menachem Tabanpour 2020)</p>  <p>(Nutrient Recovery & Upcycling LLC 2022)</p>
Anlægsplacering	Teknologiens optimale placering er efter første trin af en Two-stage anaerob nedbrydning, grundet det let sure pH niveau samt frigivelsen af fosfationer. CalPrex er udviklet til EBPR anlæg for optimal frigivelse af fosfationer under anaerobe forhold, og optimalt udbytte.
Effektivitet	CalPrex har en effektivitet op til 50% af total-P tilført anlægget. Effektiviteten er afhængig af en optimal bio-p. (cnp u.d.)
Omkostninger	Implementering kan være kompliceret og kræve store investeringer til procesanlæg. Omkostninger til calcium, strøm samt vedligehold.
Teknologiskudviklingsniveau Fordele og ulemper	<p>Teknologien er testet i pilotskala på 2 anlæg i Amerika. (centrisys 2022)Teknologien er patenteret og TRL-niveau er vurderet til 5-6.</p> <p>Forretningsområdet for implementering af teknologien er begrænset til anlæg med EBPR (Enhanced Biological P Removal) samt muligheden for efterfølgende at frigive fosforen i et let surt miljø. Effektiviteten vil være begrænset på CPR (Chemical P Removal) anlæg.</p>

	En fordel ved teknologien er at ved at tage opløst fosfat ud inden afvanding, undgås uønskede fældninger i rør og pumpe installationer.
Afsætningsmuligheder	Anvendelse af brushit som gødningsprodukt viser fordele på jorden og vækst af afgrøder. Produktet er klassificeret som klasse A, baseret på patogen og metalindholdet. Produktet anvendes som et kommercielt gødningsprodukt, og distribueres igennem virksomheden Steady State fertilizer.

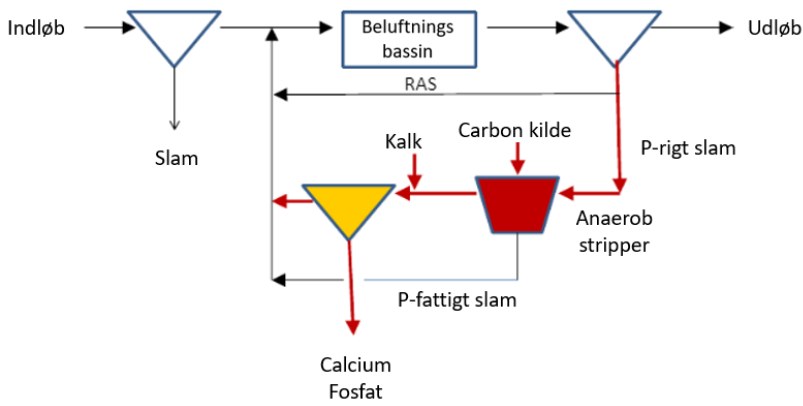
Kommercielt navn	ViviMag
Produktnavn	Vivianit
Kemisk beskrivelse	Vivianit er et jernfosfatmineral, $Fe(II)_3(PO_4)_2 \cdot 8 H_2O$. Den kemiske formel fortæller at jern på reduceret form, Fe^{2+} , er hovedelementet i dannelsen af fosfatmineralet, vivianit. Mineralet oxideres let og en del af jernet vil være som $Fe(III)$ i vivianit produktet. Fe:P molforholdet i vivianit ligger på 1,5, hvilket betyder det i praksis kan være nødvendigt at tilsætte ekstra jern. Resultaterne fra AP1, viser at vivianit er det mest dominerende fosfatfraktion i slam i de udvalgte analyserede anlæg. Vivianit krystallerne har paramagnetiske egenskaber, hvilket betyder at krystallerne påvirkes af magnetfelter.
Beskrivelse	<p>ViviMag er inspireret af magnetisk separation anvendt i mineindustrien. Princippet med teknologien er at udnytte vivianits paramagnetisk egenskab og udvinde krystallerne fra slammet med en magnet.</p> <p>For at fremme og øge dannelsen af vivianit tilsættes jernsalte til hovedstrømmen og eventuelt også i slamstrømmen på renseanlægget for at udfælde fosfat i slamstrømmen. Udrådnet slam indeholdende vivianitkrystaller pumpes igennem den magnetiske separationsenhed (ViviMag), hvorefter de separerede krystaller renses og opkoncentreres. Opkoncentreringsteknologien optimeres stadig og er dermed ikke fuldt udviklet. (W.K. Wijdeveld 2022)</p> <p>Vivianit kan opløses i basiske opløsninger som gør det muligt at få 2 anvendelige produkter. Jernsalt til fældning på renseanlæg ($Fe(OH)_2$) samt et fosfatprodukt (K_3PO_4) som har en høj gødningsværdi.</p>  <p>(Wetsus u.d.)</p>
Anlægsplacering	Teknologiens optimale placering er i slamstrømmen efter anaerob nedbrydning/ biogasreaktor. Nye resultater viser at en opholdstid på 2-4 dage ved anaerobe forhold er nok for optimal dannelse af vivianit. (T. Prot 2021)

	CPR (Chemical P Removal) anlæg og EBPR-anlæg (Enhanced Biological P Removal) er anlægstyper hvor teknologien kan implementeres.
Effektivitet	Foreløbige resultater viser en effektivitet på op til 60% af total-P tilført renseanlægget, forudsat at nok Fe er til stede i slammet. (W.K. Wijdeveld 2022) Effektiviteten er også opgivet direkte på slamstrømmen til at være 70 % af total-P i slammet.
Omkostninger	Omkostninger samt investering vides ikke endnu, da teknologien ikke er testet i fuld skala. Det vurderes som en relativ simpel implementeringsløsning. Der vil være omkostninger til jern, elektricitet og oprensning af vivianit.
Teknologiskudviklingsniveau	Teknologien er testet succesfuldt i pilotstørrelse på et renseanlæg i Holland (Nieuwveer) med et flow på 1 m ³ /h. TRL-niveau vurderes 6.
Afsætningsmuligheder	Direkte forbrug af vivianit som jerngødningsprodukt, men gødningsværdien kendes endnu ikke. Derudover forskes der i anvendelse af vivianit i LiFePO ₄ batterier. Mulige anvendelsesområder afsøges stadig. Vivianit kan videre behandles, så P og Fe separeres til to produkter. Fe-produktet kan genbruges som fældningskemikalie på renseanlæg. P-produktet kan anvendes som effektivt gødningsprodukt eller som flammehæmmende i bl.a. maling. Den mest optimale afsætnings er dog ikke undersøgt konkret endnu.

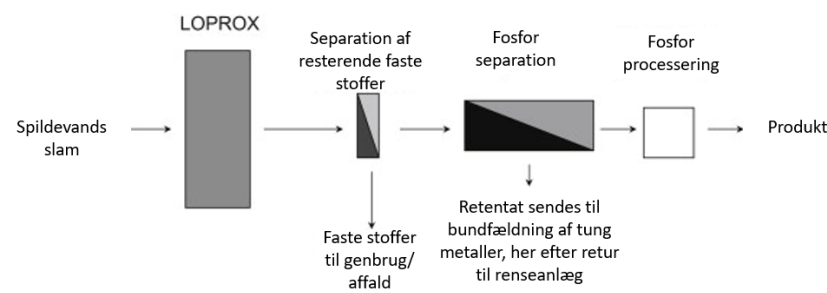
Kommercielt navn	RAVITA
Produktnavn	Fosforsyre
Kemisk beskrivelse	Fosforsyre er en almen kendt middelstærk syre, H ₃ PO ₄ . Fosforsyre er i ren form et krystallinsk fast stof, som nemt kan opløses i vand til forskellige koncentrationer. Fosforsyre produceres i dag fra råfosfat, som er en begrænset ressource.
Beskrivelse	RAVITA processen er en fældningsteknologi kombineret med en efterbehandling af de udfældede fosfatforbindelser. Fældningskemikalier i form af metalsalte (aluminium eller jern) anvendes i hovedstrømmen som efterfældning. Den kemisk produceret slam separeres fra det fosfatrenset spildevand med sedimentation, flotation eller filtrering. Det kemiske slam opløses med fosforsyre, hvorefter det opløste metalsalte og fosfat separeres med ekstraktion eller ionbytning. Metalsalte genanvendes som fældningskemikalier i hovedstrømmen. Den overskydende separerede fosforsyre anvendes som slutproduktet fra RAVITA processen. Kvælstof kan også genindvindes fra sidestrømmen med RAVITA processen. En kombination af stripping og fosforsyre giver slutproduktet ammoniumfosfat, (NH ₄) ₃ PO ₄ . Resultater fra pilotskala tests har vist at en væsentlig problematik er dannelsen af flydende flokke indeholdende anvendt metalsalt samt fosfor, der udledes til recipienten. (Laura Rossi 2018)

	<p>(HSY 2022)</p>
<p>Anlægsplacering</p>	<p>Processens optimale placering er i hovedstrømmen efter alt biologisk rensning, og efter separering af slam. Bio-p rensning er ikke optimalt for RAVITA processen. Det optimale molforhold mellem Aluminium og fosfor (Al:P) er 2,6 for at opnå en udløbskoncentration på minimum 0,5 mg TP/l. (Laura Rossi 2018) Selvom one-step fældning har en høj effektivitet, anvendes two-step fældning for at undgå høje fosfor koncentrationer i udløbet.</p>
<p>Effektivitet</p>	<p>RAVITA processen har en effektivitet op til 70% af total P tilført anlægget, fra pilotskala anlæg. Effektiviteten er afhængig af separationsprocesserne. (Laura Rossi 2018) Effekten er også afhængig af den biologiske bio-P.</p>
<p>Omkostninger</p>	<p>Anlægget er ikke kommercialiseret endnu og omkostningsniveau er derfor stadig ukendt. Det vurderes at anlægget er relativt komplekst, og kræver store hydrauliske kapaciteter på anlægget. Derudover vigtigt at fosforen ikke udfældes ukontrolleret tidligere i rensprocessen. Der må forventes betydelige ombygninger i forbindelse med implementering. Omkostninger til kemikalier forventes betydelige i driften.</p>
<p>Teknologiskudviklingsniveau u Fordele og ulemper</p>	<p>Teknologien testes på et 1000 PE pilotanlæg i Helsinki. (HSY 2022) TRL-niveau er vurderet til 7</p>
<p>Afsætningsmuligheder</p>	<p>Fosforsyre er et af de mest anvendte industrielle kemikalier i verden. Det anvendes bl.a. til fremstilling af gødning, kosmetik, kemikalier og meget andet.</p>

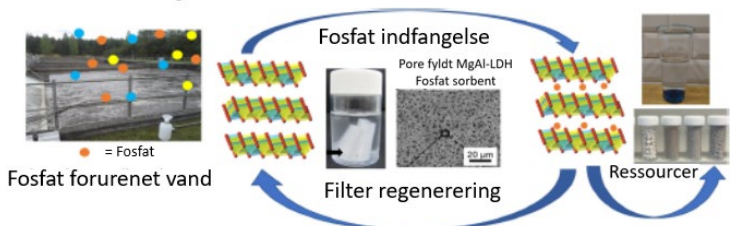
<p>Kommercielt navn</p>	<p>PHOSTRIP</p>
<p>Produktnavn</p>	<p>Hydroxyapatit (HAP)</p>
<p>Kemisk beskrivelse</p>	<p>Hydroxylapatit er en calciumfosfat krystal, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$, men skrives oftest med den kemiske formel $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, da krystallerne består af to enheder. Ca:P molforholdet i hydroxylapatit er 1,67:1, som beskriver en nødvendighed for et forholdsvis højere forbrug af calcium. Hydroxylapatit er en stor del af strukturen i knoglevæv.</p>
<p>Beskrivelse</p>	<p>PHOSTRIP er en fældningsteknologi som anvendes i let basiske strømme (pH 8-9). Sekundær/aktiv slam indeholdende fosfor stripes under iltfrie forhold, for frigivelse af reaktiv orthofosfat til kontrolleret krystallisation. Den fosfatrige sidestrøm tilsættes calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$), under en reguleret pH (optimalt ved</p>

	<p>pH 9) udfælder hydroxylapatit som separeres og kan anvendes som gødningsprodukt. Udfældning af apatit sker ikke spontant, men skal stimuleres ved tilsætning af f.eks. sand eller calciums silikater. Afhængig af de kemiske betingelser udfældes en eller flere forskellige nærtbeslægtede calciumfosfatminerale, men det termodynamisk stabile produkt er apatit.</p>  <p>(Samuel Jeyanayagam 2012)</p>
<p>Anlægsplacering</p>	<p>Teknologiens optimale placering er efter anaerob stripper for orthofosfat. Udvinning af hydroxyapatit er optimalt på et EBPR-anlæg for at opnå optimalt udbytte. Udfældning af hydroxyapatit kan implementeres på sidestrømmen fra anlæg med anaerob nedbrydning, da sidestrømmen vil have et højt indhold af fosfat. Strømmen skal justeres til pH 9, for optimal genindvinding.</p>
<p>Effektivitet</p>	<p>Effektiviteten er ikke opgivet for genindvindingen.</p>
<p>Omkostninger</p>	<p>Omkostninger til kemikalier, calcium og pH regulering. Implementering af nye tanke til processen, vurderes som en relativ stor investering.</p>
<p>Teknologiskudviklingsniveau Fordele og ulemper</p>	<p>PHOSTRIP blev implementeret på en håndfuld østrigske, tyske og amerikanske anlæg i 90'erne. (E. Kaschka 1999) Dog er teknologien ikke siden blevet udviklet og kommerialiseret. TRL-niveau er vurderet til 9.</p>
<p>Afsætningsmuligheder</p>	<p>Apatit kan anvendes som gødningsprodukt eller opløses til fosforsyre.</p>

<p>Kommercielt navn</p>	<p>PHOXNAN</p>
<p>Produktnavn</p>	<p>Fosforsyre</p>
<p>Kemisk beskrivelse</p>	<p>Fosforsyre er en almen kendt middelstærk syre, H₃PO₄. Se beskrivelsen under RAVITA.</p>
<p>Beskrivelse</p>	<p>PHOXNAN er en fosforindvindingsproces samt en slambehandlingsproces for at mindske mængden af slam der skal bortskaffes.</p> <p>PHOXNAN er en udvidet udgave af LOPROX processen som er en oxidationsproces under lavt tryk, som udvides med 2 membranfiltrering trin. Slammet behandlet under tryk (12-28 bar), øget temperatur (160-220 °C) og ved en pH justeret til 1,5 med oxygen</p>

	<p>for en optimal oxidation af organisk materiale i slammet, for frigivelse af biologisk og kemisk bundet slam. pH justeres med en svovlsyre under LOPROX oxidationen, grundet den lave pH forekommer det frigivet fosfor hovedsageligt som fosforsyre.</p> <p>Efter slammet er behandlet separeres slammet fra med ultrafiltrering. Det fosforrige koncentrat indeholder opløste elementer som filtreres fra med nanofiltreringsmembran, som giver et rent fosforsyreprodukt til anvendelse samt en strøm indeholdende bl.a. kvælstof, tungmetaller og andre opløste komponenter. Tungmetallerne kan fældes for en yderligere rensning af spildevandet som ledes tilbage til spildevandsprocessen.</p> <p>Teknologien er testet på forskellige typer slam fra renseanlæg i laboratorie. Her viste det udfordringer med slam fra renseanlæg der anvender jernsalte. Under LOPROX oxidationen, oxideres jern til Fe(III) som har en hurtig fældningsreaktion med fosfat, som resultere i et produkt med lav fosforkoncentration. (Blöcher , Niewersch og Melin 2012)</p>  <p>(Blöcher , Niewersch og Melin 2012)</p>
<p>Anlægsplacering</p>	<p>Teknologiens optimale placering er i slamstrømmen på anlæg der anvender bio-p eller aluminium som fosforrensning. Processen kan anvendes på både anaerobt udrådnnet slam og ikke behandlet slam, dog men den største slamreduktion i udrådnnet slam.</p>
<p>Effektivitet</p>	<p>Effektiviteten for PHOXNAN er opgivet til 40-50% af tilført P på anlægget. (A. Amann 2018)</p>
<p>Omkostninger</p>	<p>Investering samt driftsudgifter vil formodentlige være høje, grundet installation af membraner samt oxidationsreaktor under tryk. Driftsudgifter går bl.a. til svovlsyre og oxygen. Anlæg skal være forholdsvis store for at implementering kan betale sig (< 100.000 PE). (Blöcher , Niewersch og Melin 2012) Investeringen kan have en gavnlig betydning for den øget nedbrydning af organiskmateriale som medfører mindsket mængde slam, der skal bortskaffes.</p>
<p>Teknologiskudviklingsniveau Fordele og ulemper</p>	<p>Teknologien er testet på et pilotanlæg. Der er dog ikke sket yderligere udvikling af teknologien de seneste år eller fuldskala implementering til at verificere effektivitet samt drift. TRL-niveau er vurderet til 5.</p> <p>Anvendelsen af LOPROX eliminerer mikroforureninger som medicinrester og andet svært omsættelige stoffer. PHOXNAN er speciel sammenlignet med andre genindvindingsteknologierne da det kombinerer slambehandling og fosfor-genindvinding i en samlet proces.</p>

Afsætningsmuligheder	Fosforsyre kan anvendes til en del forskellige industrielle formål. Det kan anvendes som gødningsprodukt. Rene produkter kan anvendes i rengøringsmidler eller kosmetik. Fosforsyren kan også udkrystalliseres som struvit eller lign gødningsprodukt.
----------------------	--

Kommercielt navn	Fosfatselektive filtermaterialer (Ikke kommercielt tilgængeligt)
Produktnavn	Fosfat – fosforforbindelsen er endnu ikke konkretiseret i forskningen
Kemisk beskrivelse	Målet er primært at fjerne uorganisk fosfat i vandfasen ved at binde det til en sorbent dernæst fremstilles kemisk veldefinerede uorganiske fosfatforbindelser ved efterbehandling.
Beskrivelse	<p>Ideen er, at fosfat bindes til filtermaterialet, der kan fjernes fra spildevandet. Filtermaterialet kan regenereres og fosfat opkoncentreres. Princippet minder om de zeolitter, der bruges til demineralisering af vand i kemilaboratorier. Udfældningsteknikker f.eks. vivianit, struvit og calciumfosfater dannes produktet direkte ved udfældning fra spildevandet, dermed er udfældningsteknikker følsom overfor driften af anlægget.</p>  <p>(Nielsen 2022)</p> <p>Der arbejdes overordnet med to typer af filtermaterialer.</p> <p>a) Sorbenter med høj affinitet for fosfat f.eks. aluminium og jernhydroxider. Der testes også forskellige biopolymere, som er kemisk modificeret.</p> <p>b) Ionbyttere f.eks. lagdelte dobbelthydroxider (LDH), der er anionbytter med høj affinitet for fosfat. Mest lovende er såkaldt magnesium aluminium LDH'er.</p> <p>Udviklingen er primært på optimering af filtermaterialets fosfatadsorptionskapacitet. Der skal forskes en del i regenerering og formulering af filtermaterialet inden kommerciel anvendelse.</p> <p>Bemærk man tester især i Kina filtermaterialer baseret på lanthanhydroxider ($\text{La}(\text{OH})_3$). Disse er ikke interessante for danske forhold bl.a. fordi La(III) er giftigt, er et relativt sjældent grundstof. Fosfat bindes meget stærkt som lanthanfosfat, teknologien bruges i dag primært til kemisk sørestaurering (immobilisering af fosfat). Tilsvarende eksperimenteres med zirconium doping, der er problematisk ift. tungmetaller. (Baile Wu 2020)</p>

Anlægsplacering	Filtermaterialer opereres optimalt i fosfatrige og relative klare strømme. En optimal strøm er eksempelvis sidestrømmen fra EBPR-anlæg. Optimeres teknologien til lave fosfatkoncentrationer kan det anvendes som efterpolering.
Effektivitet	Der er kendte udfordringer med f.eks. carbonat og tilstopning af organisk materiale. Der mangler en del forsknings- og udviklingsarbejde førend teknologien er kommercielt tilgængeligt.
Omkostninger	Teknologien er ikke opskaleret og testet i stor skala. Derfor kan omkostninger ikke præciseres. Det kan vurderes udgifter til kemikalier for regenerering, strøm samt filtermaterialet. Der må stadig forventes en del investering i udviklingen af teknologien.
Teknologiskudviklingsniveau	Filtermaterialer testes på laboratorier og enkelte pilotskalaer, TRL-niveau vurderes til ≤ 4 . (Baile Wu 2020)
Afsætningsmuligheder	Ved at isolere fosfat på filtermaterialet kan fosfat opkoncentreres og efterbehandles senere til et ønsket produkt. Det kan fældes som ønsket f.eks. et calciumfosfat som apatit eller brushit, men der vil også kunne fremstilles fosfatforbindelser til andre industrier.

Referencer

- HORIZON 2020 WORK PROGRAMME. 2014-2015 "G. Technology readiness levels (TRL)."
- A. Amann, O. Zoboli, J. Krampe, H. Rechberger, M. Zessner, L. Egle. "Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater." *Resources, Conservation and Recycling* 130, 2018.
- al., Zhao et. "Evaluation of revolving algae biofilm reactor for nutrients and metals removal from sludge thickening supernatant in a municipal wastewater treatment facility." *Water Research*, 143 (2018): 467-478.
- Baile Wu, Jun Wan, Yanyang Zhang, Bingcai Pan, Irene M. C. "Selective Phosphate Removal from Water and Wastewater using Sorption: Process Fundamentals and Removal Mechanisms." *Environmental Science & Technology* 54, 2020.
- Blöcher, Christoph, Claudia Niewersch, and Thomas Melin. *Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration*. Elsevier, 2012. Volume 46
- centrisys. *Pilot tests*. 2022. <https://www.centrisys-cnp.com/cnp-installations/calprex?hsLang=en>.
- chawaga, Peter. *How Algae Is Turning Nutrient Removal Problems Into Profit*. 2017.
- cnp, Centrisys. "Process CalPrex." *Centrisys cnp*.
- E. Kaschka, S. Weyrer. *PHOSTRIP HANDBOOK*. 1999.
- Easy mining. *Easy mining*. 2022. <https://www.easymining.se/technologies/ash2phos>.
- EasyMining. *Ash2Phos will be implemented in Germany*. 2021. <https://www.easymining.se/newsroom/articles-news/ash2Phos-in-germany/>.
- Fore, Allison. "DOE grant will aid MWRD-Iowa State University partnership." *Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago*, 2020.
- Gabriel Ación, F., Cintia Gómez-Serrano, Maria del Mar Morales-Amaral, Jose M. Fernández-Sevilla, and Emilio Molina Grima. *Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment?* Springer Science and Business Media LLC, 2016.
- Ghosh, Shayok. "Optimization of phosphorus recovery from anaerobic digester supernatant through a struvite crystallization fluidized bed reactor." 2016.
- Glaser, Lehr. "Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta analysis." *Nature Scientific Reports*, 2019. Volumen 9
- Gross-Wen Technologies. 2022. <https://algae.com/technology>.
- HSY. *RAVITA process*. 2022. <https://www.hsy.fi/en/ravita/process/>.
- Laura Rossi, Sini Reuna, Tommi Fred, Mari Heinonen. "RAVITA Technology - new innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery." *Water Science & Technology*, 2018. Volumen 78
- Menachem Tabanpour, Leon Downing, Wendell Kuhnjar. *Demonstrating the Calprex System for High-Efficiency Phosphorus Recovery*. The Water Research Foundation, 2020.

Nielsen, Ulla Gro. "Illustration af filtermateriale princip." 2022.

Nutrient Recovery & Upcycling LLC. *P recovery*. 2022. <https://nrutech.com/pages/p-recovery>.

OSTARA. *From Struvite to Stewardship*. 2022. <https://ostara.com/municipal-utilities/>.

Samuel Jeyanayagam, Thomas Hahn, Robert Fergen, Joshua Boltz. "Nutrient Recovery, an Emerging Component of a Sustainable Biosolids Management Program." *Water Environment Federation*, 2012.

T. Prot, W. Pannekoek, C. Belloni, R. Henrikx, A. I. Dugulan, L. Korvig, M.C.M. van Loosdrecht. "Formation of vivianite in excess waste activated sludge and its correlation with Fe(III) reduction." *Water Research*, 2021.

W.K. Wijdeveld, T. Prot, G. Sudintas, L. Korving, M.C.M van Loosdrecht. "Pilot-scale magnetic recovery og vivianite from digested sewage sludge." *Water Reseach 212*, 2022.

Wetsus. n.d.