

Potensialet for biologisk fosforfjerning ved norske rensesanlegg

Av Torgeir Saltnes, Gjermund Sørensen og Sondre Eikås

Torgeir Saltnes, Gjermund Sørensen og Sondre Eikås er alle ansatt i Hias IKS, og har hhv. en dr.ing.-grad innenfor vannbehandling, en bachelorgrad innenfor bygg/VA og en mastergrad innenfor økologi.

Summary

At Hias wastewater treatment plant near the city of Hamar, a new biological phosphorus removal process is developed. The process is based on biofilm on carriers, and has been operated in pilot scale for more than 2.5 years. The first full scale version is now under construction. Carriers with biofilm were used to test the potential for biological phosphorus removal on wastewater from 3 other treatment plants in Norway. The results showed that the wastewaters from Frevar, Movar and Bekkelaget contained organic substances (COD) that was available as carbon source for PAO. The dissolved phosphorus fraction was removed to a concentration below 0,1 mg/l from all the wastewaters. For all the wastewaters simultaneous nitrification and denitrification were observed, and might be a carbon-efficient way to remove both phosphorus and nitrogen.

Sammendrag

En nyutviklet prosess for kontinuerlig biologisk fosforfjerning basert på biofilm er kjørt i pilot-skala på Hias RA ved Hamar i over 2,5 år. Prosessen bygges nå ut i full skala. Bæremedium med biofilm fra pilotanlegget er brukt for å teste potensialet for biologisk fosforfjerning på avløp fra 3 andre norske rensesanlegg. Resultatene viste at avløp fra Frevar, Movar og Bekkelaget inne-

holdt organisk materiale som kunne brukes som karbonkilde for fosforakkumulerende organismer (PAO). Løst fosfor ble fjernet til en konsentrasjon under 0,1 mg/l fra alle avløpene. Simultan nitrifisering og denitrifisering i aerob sone ble observert for alle avløpene, og kan være en karboneffektiv måte for fjerne både fosfor og nitrogen.

Innledning

Forsøk med biologisk fosforfjerning har pågått over flere år på Hias RA ved Hamar (Saltnes m.fl., 2014 og Sørensen, 2013). Dette arbeidet har ledet fram til en kontinuerlig biofilmprosess for biologisk fosforfjerning som nå bygges ut i full skala. Samtidig fortsetter pilot og lab-skala forsøk med prosessen for å implementere/optimalisere nitrogenfjerning i den samme prosessen.

I den nyutviklede prosessen brukes tradisjonelle MBBR-bærere (Moving Bed Biofilm Reactor) som strømmer med avløpsvannet gjennom anaerobe og aerobe soner, og flyttes mekanisk uten vann fra aerob tilbake til anaerob sone. Prosessen er beskrevet mer i detalj i Saltnes, Sørensen og Eikås (2014).

Forsøkene som er beskrevet har til hensikt å indikere om avløpsvann fra andre norske rensesanlegg også kan behandles med en biologisk fosforfjerningsprosess.

Biologisk fosforfjerning baserer seg på fosforakkumulerende organismer (PAO), som er i stand til å ta opp og lagre lett nedbrytbart organisk materiale under anaerobe forhold. PAO henter energi til dette ved å bryte opp interne polyfosfatlagre, dette fører til at det slippes løs fosfat (PO₄). Under aerobe forhold brukes de interne lagrene av organisk materiale til cellevekst, og til å ta opp og lagre fosfat i polyfosfatlagre. En PAO er i stand til å ta opp mer fosfor aerobt enn den slipper anaerobt, som gir et netto opptak av fosfor. For å utnytte denne egenskapen til PAO er man avhengig av å utsette organismen for vekslende anaerobe og aerobe forhold.

En gruppe av PAO kan også ta opp fosfat under anoksiske forhold, da nitrat kan erstatte oksygen som oksidasjonsmiddel (Kern-Jesperen, 1993). I et kombinert fosfor og nitrogenfjerningsanlegg, ville dette være fordelaktig fordi fosfor kan tas opp og nitrat denitrifiseres med det samme lagrede karbonet av denitrifiserende PAO (DNPAO).

I aerob sone vil ammonium bli nitrifisert dersom innholdet av biotilgjengelig organisk materiale er lavt, og tilgangen til oksygen er god. Denitrifisering er en anoksiske prosess hvor nitrat fra nitrifisering av ammonium omsettes til nitrogen gass, og prosessen er avhengig av at det ikke er oksygen til stede. I en biofilmprosess vil det være mulig for nitrifiserende bakterier å fungere ytterst i biofilmen hvor tilgangen på oksygen er god, samtidig som denitrifiserende bakterier kan fungere lenger inn i biofilmen hvor tilgangen til oksygen er begrenset.

Tabell 1 viser en oversikt over de viktigste bakteriegruppene i prosessen.

En kombinasjon av biologisk fosforfjerning og simultan nitrifikasjon/denitrifikasjon i aerob sone har en rekke fordeler:

- Det organiske materialet i avløpet utnyttes fornuftig
 - Tas opp av PAO og DNPAO i anaerob sone som er første trinn i prosessen
 - DNPAO bruker det samme karbonet til fosforopptak og denitrifisering, og behovet for karbon reduseres
 - DNPAO tar opp karbon anaerobt hvor tilgangen er god, og bruker det lagrede karbonet i anoksiske lag i biofilmen i aerob sone.
 - Nivået av organisk materiale er redusert før aerob sone, dette øker nitrifiseringen.
 - Dersom avløpet mangler karbon til fosforopptak eller denitrifisering, kan dette tilsettes i anaerob sone og bli tatt opp av PAO og DNPAO.
- Anleggsvolumet kan reduseres
 - Både nitrifikasjon og denitrifikasjon skjer i aerob sone.
 - Løst fosfor kan fjernes ned til lave konsentrasjoner, dette reduserer/fjerner behovet for kjemisk felling

Potensialet for å rense avløp med en biologisk fosforfjerningsprosess avhenger mye av mengde og type organisk materiale i avløpet. En PAO tar opp organisk materiale under anaerobe forhold i form av korte karbonkjeder, det vi kaller VFA (1-5 karbonatomer). Dersom avløpet inneholder

	Anaerobt		Aerobt/Anoksiske		
	Tas opp	Slippes ut	Tas opp	Slippes ut	Forbrukes/oksidasjonsm.
PAO	c-c	PO ₄	PO ₄		O ₂
DNPAO	c-c	PO ₄	PO ₄	N ₂	NO ₃ eller O ₂
Fermenterere/Hydrolyserere	C	c-c			
Nitrifiserere			NH ₄	NO ₂ og NO ₃	O ₂
Denitrifiserere	C (NO ₃)	N ₂	C	N ₂	NO ₃

c-c: korte karbon kjeder, C: tyngre nedbrytbart karbon.

Tabell 1. Oversikt over de viktigste bakteriegruppene i prosessen.

lite VFA kan dette produseres ved fermentering og hydrolyse under anaerobe forhold, ved å ha en lang anaerob oppholdstid (Grady m.fl., 2011). Anaerobe bakterier kan da bryte ned lange karbonkjeder til kortere kjeder som blir tilgjengelig for en PAO.

Avhengig av den biologiske tilgjengeligheten på det organiske materialet, pH og andre betingelser i avløpet, vil det tas opp en viss mengde energi i form av karbonforbindelser per mengde fosfor som slippes ut av PAO-cellene under anaerobe forhold (Henze, 2008). Det vil bl.a. være behov for mer organisk materiale (mer energi) ved høy pH eller når det organiske materialet består av lengre karbonkjeder (Pijuan m.fl., 2004). Dette betyr at fosforslipp under anaerobe forhold ikke direkte er et mål for hvor mye karbon en PAO har lagret. Det er mengden lagret karbon under anaerobe forhold som gir potensial for fosforopptak under aerobe forhold.

Temperaturen på avløpet vil påvirke kinetikken til de biologiske prosessene slik at alt går tregere ved lav temperatur. I et biologisk fosforfjerningsanlegg er det bare en andel av bakteriekulturen som er PAO, og mye av suksessfaktoren bak et godt fungerende anlegg er å redusere konkurransen om bl.a. karbon fra andre bakterier. Flere forsøk har vist (Helmer m.fl. 1998, Janssen m.fl. 2002) at biologisk fosforfjerning faktisk fungerer bedre ved lave temperaturer. Dette pga at andre bakterier blir mer påvirket enn PAO ved lav temperatur, og at konkurransen derfor dreier i favør PAO.

Metode

Slipp og opptakstest

Testen går ut på å bruke en eksisterende PAO-kultur for å studere potensialet og kinetikken for fosfor-slipp og opptak under anaerobe og aerobe forhold. Det er også mulig å studere hva som skjer med organisk materiale i avløpet, og evt. nitrifisering/denitrifisering under aerobe forhold.

I forsøkene ble avløp fra Frevar RA, Movar (Fuglevik RA) og Bekkelaget RA testet i parallell med avløp fra Hias RA. 4 beger av 1 liter ble tilført bæremedium med PAO-kultur fra Hias sitt

pilotanlegg for biologisk fosforfjerning, til en fyllingsgrad på 60%. Til hvert av de 4 forskjellige begrene ble det tilsatt 1 liter avløp fra et av anleggene. Forsøket ble gjennomført som batch-tester.

I den innledende anaerobe fasen holdes bæremediet med PAO-kultur i bevegelse av en statisk mikser (jar-test utstyr). Det er viktig at miksing er rolig da det i minst mulig grad skal tilføres oksygen til avløpet i anaerob fase. Etter den anaerobe fasen stoppes omrøringen, og luft tilsettes via små diffusorer. Det ble tilsatt rikelig med luft for ikke å skape oksygenbegrensning for biologien. Oksygennivået i begrene ble målt til mellom 8,9 og 9,2 mg/l. Avløpets temperatur varierte mellom 8 og 14°C under testen. Anaerob fase varte i 2,5 timer, mens aerob fase varte i 3,5 timer, som gir en total oppholdstid på 6 timer.

Prøver av avløpet fra hvert beger ble jevnlig tatt ut under anaerob og aerob fase. Prøvene ble umiddelbart filtrert gjennom 1 µm filterpapir og analyser ble utført på det filtrerte avløpet. Resterende prøve ble tilbakeført til sitt respektive beger.

Avløpsvannet

Avløpet fra Frevar, Movar og Bekkelaget ble hentet samme dag som testen ble gjennomført, og holdt ved ca 4°C i en kjølebagg i maks 5 timer. Avløpsprøvene var stikkprøver hentet ut rett etter innløpsristene ved Frevar og Movar, og rett før innløpsrista ved Bekkelaget RA. Avløpet fra de tre anleggene som ble brukt i slipp og opptakstesten ble grovfiltrert med et 100 µm filter for å simulere primæravskilling, avløpet fra Hias RA ble tatt ut etter forsedimentering.

Bakteriekulturen

Bæremediet med biofilm ble hentet fra slutten av aerob sone av et pilotanlegg som har gått kontinuerlig med biologisk fosforfjerning i 2,5 år. Prestasjonene til anlegget har variert ettersom nye betingelser og driftsmåter er testet ut. DNA analyser av bakteriekulturen har vist et varierende innhold av kjente PAO over perioden på 2,5 år på mellom 4 og 10 %, mens snittet for danske bio-P anlegg er 13 % (Krüger AS, Intern rapport). De to dominerende PAO-gruppene var

Accumulibacter og Tetrasphaera, som også er de vanligste i danske bio-P anlegg. Sammensetning og andel av PAO vil avhenge av mengden fosfor og organisk materiale i avløpet, på hvilken form det organiske materialet er og driftsbetingelser som bl.a. anaerob oppholdstid. Under slipp og opptakstesten er en bakteriekultur som har blitt tilpasset typen avløp ved Hias RA, brukt til å behandle avløp fra andre anlegg. Dette vil kunne påvirke resultatene, og det bør gjennomføres pilotforsøk med det aktuelle avløpet over et lengre tidsrom for å se hvor god en tilpasset bio-P kultur kan bli.

Prøver og analyse

Prøver av avløpet for de fire anleggene ble analysert for total fosfor (TP), løst fosfor (PO₄-P), KOF (COD), løst KOF (SCOD), nitrat (NO₃-N) og ammonium (NH₄-N). Disse prøvene ble analysert på egen lab med Spectroquant Nova 60 spektrofotometer. Prøvene ble i tillegg analysert for flyktige fettsyrer (VFA) ved fempunkts-titrering (Moosbrugger m.fl., 1993). Prøver fra slipp og

opptakstestene ble analysert for PO₄-P og SCOD under hele forsøket og i tillegg for NH₄-N, NO₃-N og nitritt (NO₂-N) under deler av forsøket.

Resultater og diskusjon

Avløpsvannets sammensetning

Tabell 2 viser analysene av avløpet for de 4 anleggene. Resultatene viser at avløpet til Hias skiller seg ut ved at det er høyere konsentrasjoner av fosfor, organisk materiale og nitrogen, mens avløpet fra Frevar generelt var tynnere enn de andre.

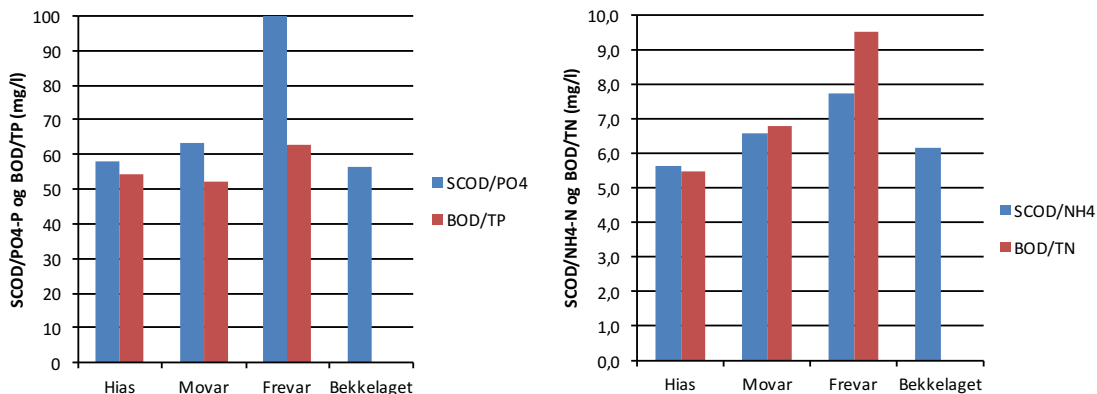
I tabell 3 vises TP, COD, BOD og total nitrogen (TN) som gjennomsnittskonsentrasjoner på innløpet for 2015 for de 4 renseanleggene. For alle anleggene var innholdet av organisk materiale lavere i stikkprøvene enn snittet for 2015, mens innholdet av fosfor er mer likt. Det generelt lavere innholdet av organisk materiale i stikkprøvene skyldes trolig at det hadde vært nedbør i perioden før uttak av prøver. Avløpet på Hias har generelt høye konsentrasjoner av både organisk materiale og fosfor grunnet mye avløp fra næringsmiddelindustri. Gjennomsnit-

(mg/l)	Hias	Movar	Frevar	Bekkelaget
TP	7,9	5,00	2,5	4,7
PO ₄	5,1	3,0	0,9	3,2
COD	553	424	311	312
SCOD	298	191	185	178
VFA	29,1	7,7	5,5	12,9
NH ₄ -N	53	29	24	29
NO ₃ -N	1,1	0,6	1,3	1,1
Fe	0,3	0,3	0,6	0,2
Al	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
pH	7,8	7,9	7,5	7,9

Tabell 2. Analyser av avløpet for de 4 anleggene.

(mg/l)	Hias	Movar	Frevar	Bekkelaget
TP	7,1	5,6	4,1	4,0
COD	833	612	629	380
BOD	384	293	258	
Tot N	70,2	43	27,1	

Tabell 3. Gjennomsnittskonsentrasjoner for de 4 anleggene i 2015.



Figur 1. C/P og C/N forhold for de 4 anleggene, SCOD/OP (stikkprøve), BOD/TP årsgjennomsnitt.

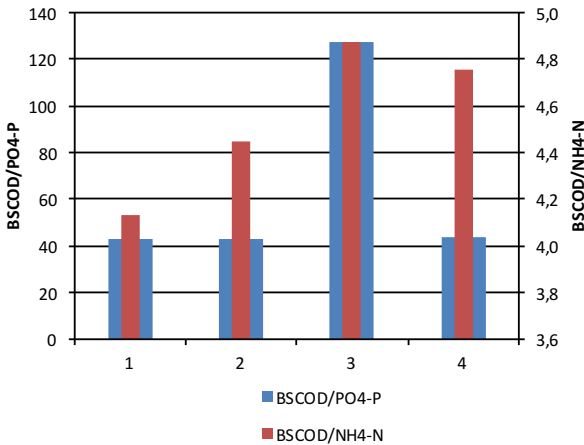
tet for 2015 for Movar og Frevar viser også forholdsvis høye konsentrasjoner for organisk materiale. På Movar skyldes dette til en viss grad tilførsel fra industri, på Frevar skyldes dette at rejektivann fra avvanning er med på innløpsprøvene for deler av 2015.

C/P- og C/N-forholdet

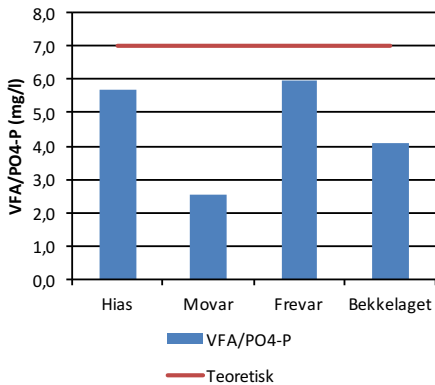
Biologisk fosfor- og nitrogenfjerning er avhengig av en viss mengde karbon for hvert mg fosfor og nitrogen som skal fjernes. Hva som er tilgjengelig karbon vil kunne variere for ulike bakterier. BOD regnes å være tilgjengelig for biologisk omsetning, men en andel av den er partikkelbundet og vil kunne fjernes før et biologisk trinn. BOD måles vanligvis over en periode på 5 dager (BOD_5), det vil derfor kunne være noe BOD som ikke er biologisk tilgjengelig innenfor en normal oppholdstid på noen timer. VFA er innholdet av de aller korteste karbonkjedene, det som er mest biologisk tilgjengelig, og som direkte kan tas opp av en PAO. Måler man SCOD vil det være en andel av dette som er inert, og ikke biologisk tilgjengelig. For fosfor og nitrogen er det de løste fraksjonene PO_4 og NH_4 , NO_3 og NO_2 som inngår i de biologiske prosessene, og som fjernes/produseres av biologien. I figur 1 er SCOD/ PO_4 -P for stikkprøven og BOD/TP for årsgjennomsnittet vist. Både analysene av stikkprøven og gjennomsnittstall for 2015 viser at Hias har et av de laveste C/P-forholdene, og det laveste C/N-forholdet av de 4 anleggene.

Under slipp og opptakstesten ble SCOD analysert en rekke ganger for alle anleggene. Forskjellen på SCOD ved start test og slutt test vil være et mål for mengde løst organisk stoff som er biologisk tilgjengelig (BSCOD) innenfor en relativt kort oppholdstid. I figur 2 er forholdene BSCOD/ PO_4 -P og BSCOD/ NH_4 -N vist. Erfaringer fra andre anlegg har vist at for å drive en effektiv prosess med biologisk fosfor- og nitrogenfjerning bør BOD/P være større enn 15-20, og BOD/N større enn 4-5 (Janssen m.fl. 2002, Grady m.fl. 2011, Helness 2007). Bekkelaget, Movar og Hias viser et BSCOD/ PO_4 -P forhold på ca 40, mens Frevar var på godt over 100. Dette indikerer at alle anleggene bør ha et potensiale for biologisk fosforfjerning. Forholdet BSCOD/ NH_4 -N viser verdier mellom 4 og 5 for alle anleggene, dette indikerer at de ligger i nedre område i forhold til hva som trengs av karbon for å denitrifisere NO_3 -N tilsvarende all NH_4 -N i innløpet. Resultatene viser også at det er Hias som har det laveste innholdet av tilgjengelig karbon i forhold til ammonium. Dersom alt tilgjengelig karbon i innløpet ble utnyttet til denitrifisering, bør alle anleggene kunne klare seg uten ekstern karbonkilde. For å nærme seg dette, trengs et biologisk fosfor- og nitrogenfjerningsanlegg som utnytter tilgjengelig karbon i innløpet på en effektiv måte.

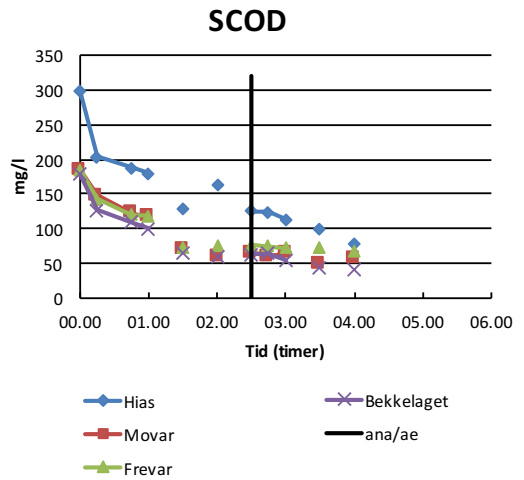
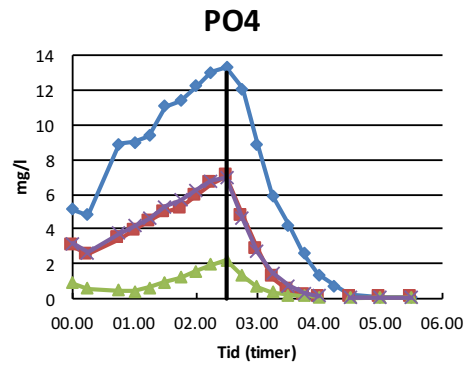
Figur 3 viser VFA/ PO_4 -P forholdet for de 4 anleggene. Teoretisk skal det være behov for 7 mg VFA for å fjerne 1 mg PO_4 -P i biologisk



Figur 2. Omsatt SCOD (BSCOD)/PO₄-P og BSCOD/NH₄-N fra slipp og opptakstesten.



Figur 3. VFA/PO₄-P-forholdet og det teoretiske behovet for VFA for å fjerne all PO₄-P i innløpet.



Figur 4. Øverst: PO₄-P-konsentrasjon i begrene gjennom anaerob og aerob periode, nederst: tilsvarende for SCOD-konsentrasjon.

fosforjerning (Grady m.fl., 2011). Dersom innholdet av VFA i innløpet var bestemmende for hvor mye PO₄-P som var mulig å fjerne med en bio-P prosess skulle ingen av anleggene klare å fjerne nok fosfor. Dette indikerer at PAO klarer å utnytte tyngre karbon forbindelser, eller at andre anaerobe organismer bryter ned tyngre forbindelser til noe som er PAO-tilgjengelige.

Slipp og opptakstest

Figur 4 viser slipp av fosfor gjennom anaerob periode og opptak gjennom aerob periode fra testen med avløp fra de 4 anleggene. Prøver fra alle anleggene viser et fosforslipp i den anaerobe fasen, som indikerer at PAO tar opp organisk

materiale og slipper fosfor. Dette underbygges av avløpets innhold av SCOD som avtar i denne fasen. Alle prøvene viser et lite fosfor opptak den første perioden, og det er her det forsvinner mest organisk. Dette skyldes trolig denitrifisering, pga. at det er med nitrat i biofilmen på bæremidiet. Denne denitrifiseringen vil bruke opp lett nedbrytbart organisk materiale som PAO kunne ha utnyttet til fosforopptak. Hastigheten på slippet, og størrelsen av det, vil påvirkes av mengde og type av organisk materiale. Et raskt slipp vil indikere at det er god tilgang til VFA, som første del av slippkurven for Hias. Et tregere slipp indikerer trolig at det organiske materialet er tyngre nedbrytbart, og at det må brytes ned før PAO kan

utnytte det. Dette er tilfellet for Bekkelaget Movar og Frevar, og siste del av anaerob periode for Hias.

Fosforslippet sier noe om hvor mye organisk stoff PAO har fått lagret som i etterfølgende aerobe periode kan brukes til fosforopptak. Figur 4 viser at det er prøven fra Hias hvor PAO har opparbeidet seg det største organiske lageret gjennom anaerob sone, etterfulgt av Movar og Bekkelaget som har nesten identiske slippkurver. Avløpet fra Frevar viser et spesielt tregt fosforslipp. I første del av anaerob periode vises et lite fosforopptak, og det blir forbrukt SCOD, som gjør tilgangen til lett nedbrytbart organisk stoff vanskeligere for PAO. Denne prøven hadde også mest nitrat i starten av anaerob periode.

For alle prøvene ble anaerob fase avsluttet etter 2,5 timer og luft ble tilsatt. Fosforopptaket starter umiddelbart i den aerobe perioden for alle prøvene. Opptakshastigheten for PAO er bl.a. avhengig av konsentrasjonen av PO_4 i vannet, slik at opptaket går fortere ved høy konsentrasjon. Dette kan sees i figur 4 hvor kurven for Hias er brattere i første del av aerob fase enn for Bekkelaget og Movar som igjen er brattere enn for Frevar.

Figur 4 viser at SCOD-opptaket i anaerob periode er forholdsvis stort. Trolig går noe av det organiske materialet med til denitrifisering helt i starten av perioden pga. nitrat. Ser man på den mengden SCOD som går med i det tidsrommet det er fosforslipp, bør dette være relatert til PAO-aktivitet. Tabell 4 viser hvor mye SCOD (mg/l) som er tatt opp i den anaerobe perioden (totalt og bare der hvor det var fosforslipp), og i den aerobe perioden. I den aerobe fasen blir all PO_4 tatt opp, mens opptaket av SCOD er lite.

Dette er en tydelig indikasjon på at fosforopptaket skjer med PAO, som har tatt opp karbon i den anaerobe perioden.

Tabell 4 viser at Hias tar opp minst SCOD per mg fosfor som slippes anaerobt, mens Bekkelaget og Movar viser høyere verdier. Tilsvarende forsøk har tidligere vist at dette forholdet er ca 10-12 mg SCOD/mg PO_4 -P for avløp fra Hias. Årsaken til at det fjernes mer SCOD/ PO_4 -P slipp for Frevar, Movar og Bekkelaget kan være at tapet til annen anaerob omsetning er større her, eller at det organiske materialet er tyngre å ta opp (koster mer energi).

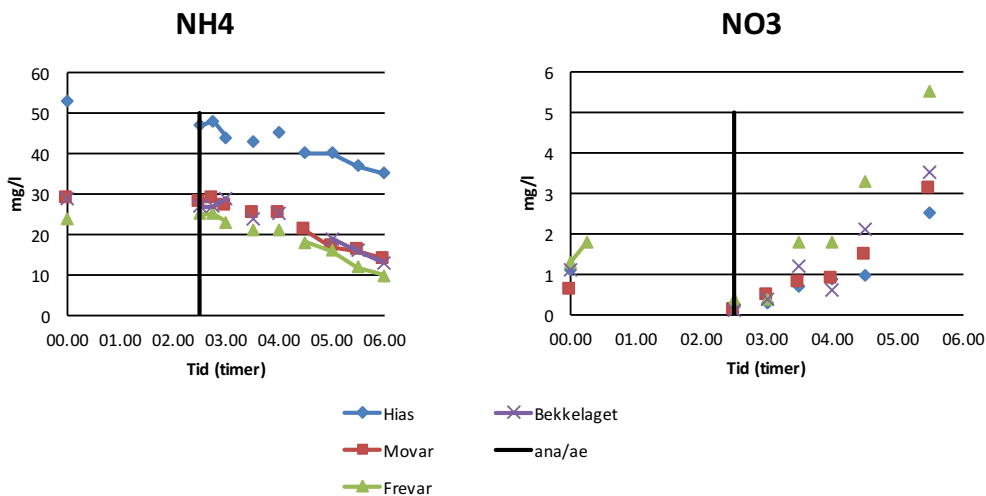
Det er uansett tydelig at alle anleggene har en betydelig andel biologisk tilgjengelig organisk materiale som kan omsettes under anaerobe forhold. Dette er et godt utgangspunkt for biologisk fosforfjerning.

Nitrogenfjerning

Resultater fra pilotanlegget hvor bæremediet med biofilmen er hentet fra, har vist simultan nitrifisering og denitrifisering i aerob sone over en lengre periode. Anlegget er imidlertid ikke optimalisert for nitrogenfjerning med tanke på styring av oksygennivåer, andel anaerob/aerob sone osv. Figur 5 viser ammonium og nitrat konsentrasjoner under slipp og opptakstesten. I aerob periode viser reduksjonen av NH_4 at nitrifiseringshastigheten er forholdsvis lik for alle anleggene. Dette er fornuftig da nitrifiseringen er sterkt avhengig av tilgangen på oksygen og ammonium som er god for alle prøvene. En annen faktor som kan hemme nitrifisering er tilgangen til organisk materiale. Da alle avløpene viser en tilnærmet lineær nitrifiseringshastighet og tilgangen til lett nedbrytbart organisk materi-

(mg/l)	Hias	Movar	Frevar	Bekkelaget
DC ana tot	173	119	109	115
DC ana PAO	79	82	43	64
DC ae tot	46	10	8	23
DC PAO/DP ana	9,3	18,2	24,2	14,9

Tabell 4. Differanser i SCOD (DC) over anaerob og aerob periode og hvor mye SCOD som blir tatt opp per mg fosfor som slippes anaerobt.



Figur 5. Venstre: Ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$) konsentrasjon, Høyre: Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) konsentrasjon, begge i mg/l.

ale er redusert etter den anaerobe perioden, ser det ikke ut til at dette er hemmende for nitrifiseringen.

Figur 5 viser også at utviklingen i nitratnivåene er ulik for de 4 anleggene. Dette indikerer forskjeller i denitrifiseringsraten, og vil være knyttet til tilgang og utnyttelse av organisk materiale. Denitrifisering under aerobe forhold må foregå uten tilgang til oksygen, i dype lag av biofilmen. Det kan enten være DNPAO som denitrifiserer med karbon som ble tatt opp i anaerob periode, eller det kan være vanlige denitrifiserere som er avhengig av tilgang på karbon i aerob periode. Tabell 5 viser mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ som er nitrifisert, og mg/l $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ som er denitrifisert. Tabell 5 viser også den teoretiske SCOD-mengden som skulle forsvunnet aerobt ut fra hvor mye $\text{NO}_x\text{-N}$ som er denitrifisert (DC aerobt teoretisk, 4 mg COD/mg nitrat (Janssen

m.fl. 2002)), sammenlignet med målt mengde SCOD-bruk (DC aerobt). For alle anleggene er forbruket av SCOD aerobt for lavt for å forsvare at denitrifiseringen skjer med vanlige DN-bakterier. Det viser at det foregår denitrifisering i aerob sone med karbon som er tatt opp anaerobt, mest sannsynlig av DNPAO.

Nitrifiseringshastigheten og denitrifiseringshastigheten for de fire anleggene er i området 0,22-0,28 $\text{g/m}^2\text{d}$ og 0,06-0,24 $\text{g/m}^2\text{d}$. Dette er lavere hastigheter i forhold til hva som kan oppnås i separate nitrifiserings og denitrifiserings-biofilmanlegg, hvor man kan regne med hastigheter på hhv 0,6 $\text{g/m}^2\text{d}$ og 0,3-0,6 $\text{g/m}^2\text{d}$ (Ødegaard, 2012). De lave hastighetene skyldes trolig at anlegget kun er optimalisert for fosforrensing, og at andelen nitrifiserende bakterier er forholdsvis lav.

(mg/l)	Hias	Movar	Frevar	Bekkelaget
Nitrifisering	18	15	14	16
Denitrifisering	15,6	8,6	3,5	8,3
DC aerobt	46	10	8	23
DC aerobt teoretisk	62	34	14	33

Tabell 5. Nitrifisering og denitrifisering vist som mg/l, reduksjon av SCOD (DC) i aerob periode og teoretisk behov for SCOD til denitrifisering.

(%)	Hias	Movar	Frevar	Bekkelaget
Fjernet NH ₄	34	52	58	55
Fjernet N	29	30	15	29

Tabell 6. % fjernet ammonium og nitrogen.

Tabell 6 viser % fjernet ammonium og nitrogen for de 4 anleggene. Dette er fjerning av løste fraksjoner, mens rensekrav vil være knyttet til totalinnholdet av nitrogen. Den totale oppholdstiden for forsøkene var 6 timer, hvor 2,5 av de var anaerob oppholdstid. Skal man basere seg på simultan nitrifisering/denitrifisering er det viktig å få i gang nitrifiseringen tidlig i aerob periode for å produsere nitrat til denitrifiseringen.

Konklusjoner

Avløpet fra alle de 4 norske renseanleggene viste at fosforet kunne fjernes med biologisk fosforfjerning.

Det var fraksjoner av organisk materiale i alle avløpene som kunne tas opp anaerobt av PAO.

Nitrifiseringsraten var ca. like stor for alle anleggene.

Denitrifisering foregikk med karbon tatt opp anaerobt, mest sannsynlig av DNPAO.

Med en total oppholdstid på 6 timer ble alt PO₄-P og mellom 15-30 % av løst nitrogen fjernet biologisk for alle avløpene.

Forholdet mellom organisk materiale og fosfor i avløpsvannene, samt at fosfor ble fjernet fullstendig i slipp og opptakstestene, indikerer at potensialet for å fjerne mer fosfor er til stede for alle anleggene.

Referanser

Helmer C. og Kunst S. (1998) Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in ebpr plants, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 37, Iss. 4-5, s. 531-539.

Helness H. (2007) Biological phosphorus removal in a moving bed biofilm reactor, Dr. ing. Avhandling, NTNU.

Henze M. (red.) (2008) Biological wastewater treatment: Principles, Modelling and Design, IWA Publishing.

Janssen P.M.J., Meinema K. og Van der Roest H.F. (2002) Biological phosphorus removal, Manual for design and operation, STOWA report, IWA Publishing.

Kern-Jespersen J.P og Henze M. (1993) Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions, *Water Research* Vol. 27, No. 4, s. 617-624.

Grady C.P.L., Jr. (red.) (2011) Biological Wastewater treatment, Third Edition, IWA Publishing.

Moosbrugger R.E., Wentzel M.C., Ekama G.A. og Marais G.v.R (1993) A 5 pH point titration method for determining the carbonate and SCFA weak acid/bases in anaerobic systems, *Water Science and Technology*, Vol. 28, No. 2, s. 237-245.

Pijuan M., Saunders A. M., Guisasola A., Baeza J. A., Casas C. og Blackall L.L. (2004) Enhanced Biological Phosphorus Removal in a Sequencing Batch Reactor Using Propionate as the Sole Carbon Source, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.85, Iss. 1, s.56 – 67.

Saltnes T., Sørensen G. og Eikås S. (2014) Kontinuerlig biofilmprosess for biologisk fosforfjerning – og nitrogenfjerning, *VANN*, Nr. 4, s. 465-472.

Sørensen G. (2013) Gjenvinning av fosfor fra avløp ved Hias RA, Biologisk fosforfjerning, Bachelor avhandling ved HiG.

Ødegaard H. (red.) (2012) Vann- og avløpsteknikk, Norsk Vann