

Nitrogenfjerning ved VEAS

Konseptet, erfaringer og optimalisering

Av Kirsti Grundnes Berg, Leif Ydstebø og Ingvild Tandberg.

- Del I. En oversikt v/Kirsti Grundnes Berg, VEAS.
- Del II. Nitrifikasjon v/Leif Ydstebø, VEAS.
- Del III. Denitrifikasjon og
- Del IV. Slambehandling v/Ingvild Tandberg, tidl. VEAS.

Innlegg på seminar 17. desember 1992.

Del I. EN OVERSIKT

1. Hva skjer på VEAS

For vel 2 år siden, 18. oktober 1990, fikk VEAS pålegg om nitrogenfjerning fra Fylkesmannen i Akershus og Oslo. Ifølge pålegget skal VEAS i året 1996 ha en samlet nitrogenreduksjon på 70%. Kravet om 97% fosforreduksjon er opprettholdt inntil videre, men kan diskuteres dersom optimal drift av nitrogenfjerningsanlegget tilsier noe lavere fosforrensegrad.

VEAS har også fått pålegg om stabilisering av slammet.

Dette har generert en del arbeid.

Utråtningsanlegg for slam skal settes i drift i mars -93.

Det første ombygde og sterkt forkortede sedimenteringsbassenget settes i drift i løpet av januar 1993. I løpet av juni skal det etterfølgende biologiske nitrogenfjerningsstrinnet settes i drift. Derved er 1/8 del av anlegget ombygget fra ren kjemisk felling til kjemisk felling og biologisk nitrogenfjerning. De resterende 7/8-deler skal være ombygget til årsskiftet 1995-96.

Samtidig med utbyggingen, skal driften av anlegget gå tilnærmet som nor-

malt for å oppnå en fosforreduksjon på 97%. Det er bygd egen adkomsttunnel til anleggsområdet for å unngå transport gjennom anlegg i normal drift.

Figur 1 viser plassering av nytt slambeholdningsanlegg, omdisponering av gamle sedimenteringshaller og ny adkomsttunnel.

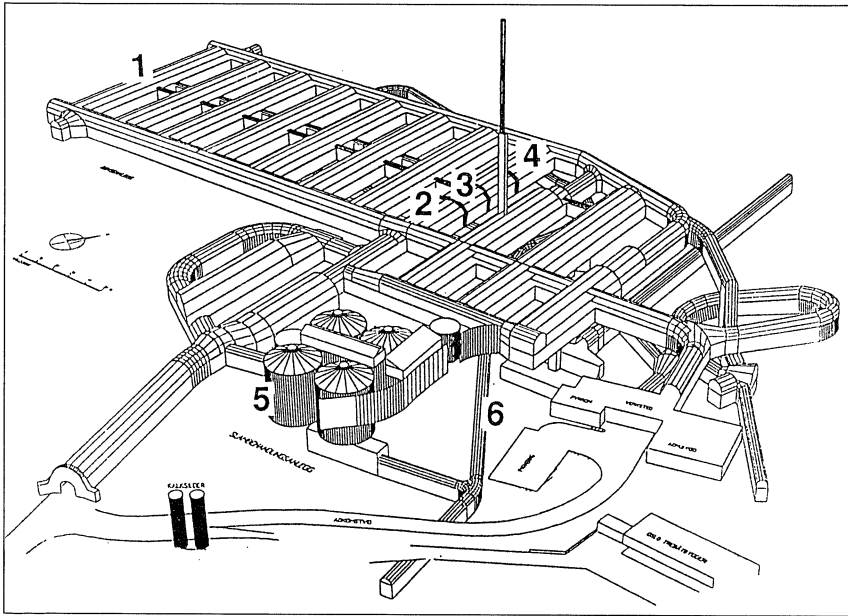
Hele utbyggingen er kostnadsberegnet til 445 mill kr. (3. kv. 1991). Av dette utgjør slambehandling 99 mill. kr.

2. Bakgrunn

VEAS ble bygd for å fjerne fosfor fra avløpsvann fra Oslo, Bærum og Asker. I 1982 var rensekravet med hensyn på fosfor 90%. I dag er kravet 97%.

NIVAs overvåking av Oslofjorden i 1985 viste at oksygeninnholdet i dyplagene var den mest kritiske faktor med tanke på et mangfoldig plante- og dyreliv og en allsidig bruk av fjorden i fritids- og næringsøyemed. (1)

Oksygenforbruket i dyplagene skyldes, i tillegg til fjordens naturlige produksjon og omsetning, tilførsel av næringsstoffer og organisk stoff. Tilførsel av fosfor (P) fører til algevekst. Ved nedbrytning av døde alger forbrukes oksygen. Nedbrytning av annet organisk stoff forbruker også oksygen. Tilført nitrogen (N) som ammonium



Figur 1. Tegning av VEAS-anlegget.

1. Opprinnelig sedimenteringshall.
2. Forkortet sedimenteringsbasseng.
3. Karbonfjerning og nitrifikasjon.
4. Denitrifikasjon.
5. Slambehandling.
6. Adkomststunnell til anleggsområde.

(NH_4^+) oksyderes, noe som også legger beslag på oksygen i dyplagene.

Innholdet av oksygen i utskiftingsvannet fra ytre fjord var også redusert.

Vel 1/3-del av oksygenforbruket i dyplagene i Indre Oslofjord skyldtes utslipp fra eksisterende VEAS-anlegg. Av dette var 2/3-deler forårsaket av ammonium.

NIVAs rapport anbefalte bl.a. forsøk i fullskala på VEAS med sikte på å fjerne organisk stoff og fjerne eller oksydere ammonium.

På bakgrunn av dette og inspirert av Ødegaard og Rustens arbeid med fastfilmprosesser, satte VEAS i gang egne forsøk.

I november 1987 forpliktet Norge seg gjennom Nordsjøavtalen til å redusere utslippene av fosfor og nitrogen i 1995 med 50% i forhold til 1985. Dette skulle oppnås bl.a. ved å ta i bruk den best mulige, tilgjengelige teknologi på rensenanleggene. (2)

Fylkesmannen i Oslo og Akershus signaliserte i 1989 at det ville komme krav om karbonfjerning, nitrifikasjon og kanskje denitrifikasjon og påla VEAS å drive forsøk med tanke på metodevalg.

Etter forsøk med biorotor i fullskala og en rekke biofiltre i pilotskala, kunne VEAS i oktober 1990 konkludere med:

- a) fjerning av organisk stoff og nitrogen var mulig,
- b) at det kunne gjøres innenfor eksisterende fjellhaller og
- c) at anlegget kunne ta hånd om mer avløpsvann.

I oktober 1990 kom, som tidligere omtalt, pålegg om nitrogenfjerning. Pålegget er begrunnet i hensyn til vannkvaliteten i Indre Oslofjord og som et av de mest kostnadseffektive tiltakene for å oppfylle Nordsjøavtalen. Nitrogenfjerning ved VEAS utgjør 10–11% av Norges reduksjon i henhold til Nordsjøavtalen.

VEAS bidrag til oksygenforbruket i dyplagene i Indre Oslofjord med nåværende og framtidig utslipp er presentert i tabell 1.

3. VEAS-konseptet for N-fjerning

Eksisterende anlegg har riststasjon, sandfang og kjemisk felling. Tilsetning av fellingsmidler; JKL, sjøvann og polymer skjer i sandfang. Det har vært en forutsetning at oppgradering av anlegget skulle skje innenfor arealet av eksisterende fjellhaller.

VEAS forslag til hvordan utvidet ren-

sing kunne gjennomføres, ble senere av Hallvard Ødegaard tegnet ut og kalt VEAS-konseptet. Konseptet omfatter kjemisk forfelling, nitrogenfjerning ved fastfilmteknikk og etterdenitrifikasjon, samt slambehandling med sikte på bruk av internt karbon i denitrifikasjonen.

Anlegget er svært kompakt. Vannets faktiske oppholdstid gjennom hele anlegget vil være 3,2 timer ved midlere belastning og 1,8 timer ved maksimal belastning.

I 1991 presenterte VEAS konseptet som er vist i figur 2 og som er kort beskrevet nedenfor.

Kjemisk forfelling

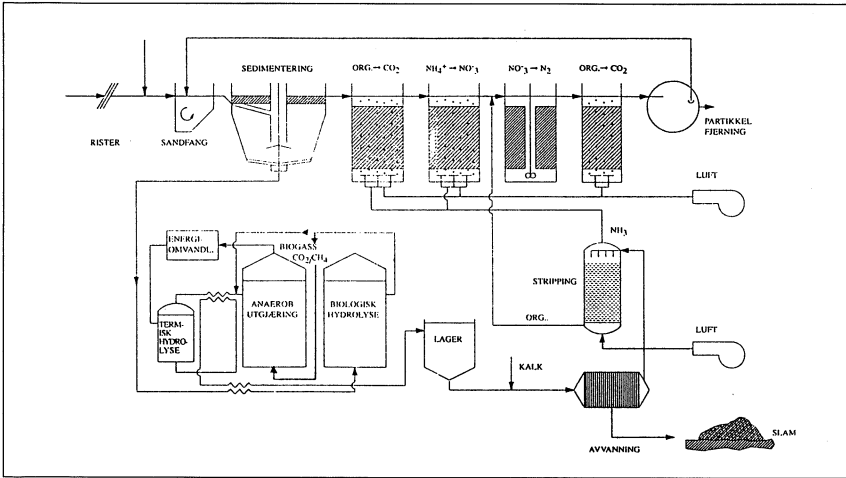
For å gjøre plass til etterfølgende biologiske N-fjerning, er SED-bassengene forkortet fra vel 80 til 18 meter, samtidig som de gjøres 11 meter dype og får ny innløpsordning.

Konseptet forutsetter utvikling av nye fellingsmidler som skal tåle den sterkt økte flatebelastningen. Av hensyn til den etterfølgende biologiske prosess, skal de nye fellingsmidlene bl.a. ikke forbruke alkalitet men bør slippe gjennom noe orto-fosfor.

Tabell 1. *Oksygenforbruk i dyplagene i Indre Oslofjord som følge av VEAS utslipp.*

	<i>Oksygenforbruk ved dagens utslipp (tonn)</i>	<i>Oksygenforbruk ved framtidig utslipp (tonn)</i>
Nitrogen	7.030	2.300
Fosfor	70	70
Organisk stoff (TOC)	2.800	1.200
Totalt fra VEAS	9.900	3.600

Beregning er gjort i henhold til NIVAs formel: TOFdypvann = 1,33 TOC + 3,8 tot-N + 5,5 tot-P



Figur 2. VEAS-konseptet for nitrogenfjerning.

Biologisk N-fjerning

Del II og III av foredraget går nærmere inn på de biologiske prosessene og slambehandling.

Først i den biologiske prosessen skjer omsetning av organisk stoff, deretter starter nitrifikasjon. Begge disse prosessene krever bl.a. god oksygentilgang, gunstig pH og alkalitet og tilførsel av noe fosfor.

Etterfølgende denitrifikasjon krever anoxiske forhold, tilgang på karbonholdig materiale og noe fosfor.

Etter denitrifikasjon må evt. restkarbon og partikler/slam fjernes.

Slam

Alt slam gjennomgår først en biologisk hydrolyse, deretter går en delstrøm direkte til termisk hydrolyse og en delstrøm via et uträttningsanlegg til termisk hydrolyse. Etter termisk hydrolyse tilsettes lesket kalk og slammet avvannes i eksisterende kammerfilterpresser. Filtratvannet, som er rikt på

lettomsettelig karbon, føres tilbake til denitrifikasjonen etter evt. stripping av ammonium.

Det pressede slammet vil nå være både stabilisert og hygienisert og det er VEAS målsetning at det som i dag disponeres i landbruket.

4. Valg av prosessleverandør for N-fjerning

For å få et best mulig grunnlag for å velge prosessleverandør arrangerte VEAS sommeren 1991 en internasjonal prekvalifiseringskonkurranse. Her var det mulig for interesserte leverandører å foreslå løsninger til hele eller deler av prosessen og presentere hvilke garantier en var villig til å gi.

Etter en vurdering av pris og ytelse ble de to mest interessante prosessleverandørene, OTV/Kruger og Degremont, bedt om å levere anbud. Anbudet omfattet det totale ansvar for å levere et ombygd VEAS til rett tid og med oppfylte konsesjonskrav.

Anbudene var ikke tilfredsstillende, bl.a. var det store avvik fra prisene i pre-kvalifiseringen, det var problemer med fristene, og enkelte forslag til tekniske løsninger var ikke praktisk mulig. Begge anbudene ble forkastet og det ble forhandlet videre om en lisensavtale om levering av prosess teknologi for N-fjerning.

På grunnlag av pris ble Degremont og deres BIOFOR-prosess valgt og intensjonsavtale ble sluttet i desember -91. Endelig kontrakt kunne ikke skrives før alle tre eierkommuner hadde gjort sine garantivedtak, noe som først skjedde juni 1992.

Aktører i utbyggingen

VEAS har valgt å ta ansvar for den kjemiske prosessdelen selv. Degremont leverer prosess teknologi for N-fjerning og har opsjon på evt. termisk hydrolyse og ammoniumstripping. Avtalen omfatter også et forsøkssamarbeid om prosessutvikling. Roediger leverer teknologi til biologisk hydrolyse og utråtning. Berdal Strømme, i samarbeid med flere andre konsulenter, har ansvar for prosjektering. Leveranse av utstyr, montering og byggetekniske arbeider skjer etter anbudskonkurranse. Utbyggingen omfatter omlag 20 anbud.

5. FoU

For å klare kravet om 70% nitrogenreduksjon allerede i 1996 er det behov for et omfattende forsknings- og utviklingsarbeid.

VEAS har fått tilsagn fra Miljøverndepartementet om 35 mill. kr. til forsknings- og utviklingsarbeid. FoU-midlene dekker forsøk i pilotskala og uttesting i fullskala installasjoner. Drift av 1—2 første linjer vil gi erfaring og

grunnlag for evt. justeringer i senere trinn.

Tilsagnet forutsatte at det ble nedsatt en faglig styringsgruppe. Gruppens mandat ble senere presisert å være

- a) å koordinere FoU-aktivitet på VEAS og Bekkelaget renseanlegg,
- b) tilrå overfor Miljøverndepartementet hvilke prosjekter som kan få støtte og
- c) sørge for at erfaringer av generell interesse er tilgjengelig for andre anleggseiere.

FoU-virksomheten i tilknytning til utbyggingen foregår i stor grad i egen regi. I 1993 og 1994 vil 6 personer være engasjert av FoU-midler, herav tre forsøksmedarbeidere, en forsøksassistent, en lab-medarbeider og en koordinator.

VEAS har også et utstrakt samarbeid med andre. Det er inngått offentlige utviklingskontrakter med støtte fra Industrifondet med Ferriklør og Norsk Leca as.

Av andre samarbeidspartnere kan nevnes NHL/Sintef: utforming og utprøving av SED-modell m/innløp, NIVA: Tilførsler og utjamning, utprøving av felleingsmidler, Aquateam as: Utforming og utprøving av modell, utprøving av fellingsmidler, alkalisering og Anox: Slam som C-kilde i denitrifikasjonen. Det har dessuten blitt gjennomført diplom- og hovedoppgaver innen områdene P-behov, utjamning av tilførsler og lystgassproduksjon ved nitrogenfjerning.

Aktiviteter i 1992

I 1992 har det vært arbeidet med utforming, skalering og utprøving av SED-basseng og det har vært utført et stort arbeid med utvikling og utprøving av fellingsmidler, både i laboratorie- og pilotskala.

Innenfor biologisk nitrogenfjerning har respons av ulike faktorer på nitrifikasjon og denitrifikasjon i BIOFOR vært studert. Det har videre vært arbeidet med utvikling av filtermateriale, termisk hydrolysat har vært utprøvd i pilot-BIOFOR og ulike hydrolysat har vært utprøvd i laboratorieskala.

Innenfor slambehandling har det vært utført innledende forsøk med utråtning, biologisk og termisk hydrolyse.

Aktiviteter i 1993

Stikkord for aktiviteten i 1993 vil være innkjøring av fullskala anlegg. Det vil fortsatt bli arbeidet med utvikling og utprøving av nye fellingsmidler

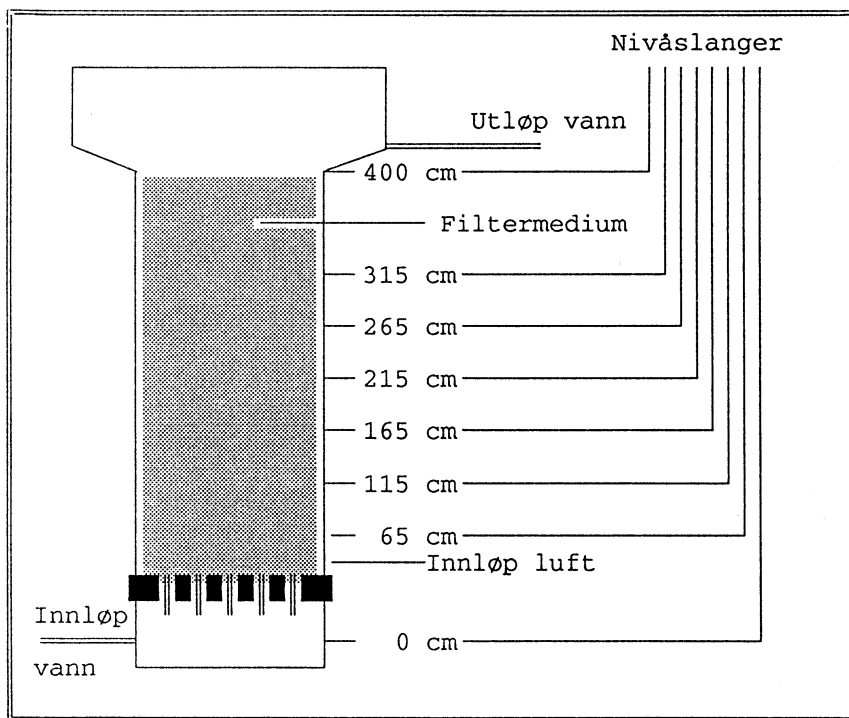
og utforming av sedimenteringsbasengene. Innen biologisk nitrogenfjerning vil optimalisering med tanke på rensresultat og økonomi ble en viktig oppgave. Innen slambehandling vil ulike kombinasjoner av biologisk og termisk hydrolyse ble prøvd ut.

Det foreligger en rekke tilgjengelige rapporter fra det arbeidet som er utført.

Del II: Nitrogenfjerning med BIOFOR

VEAS har valgt en biofilmreaktor av typen BIOFOR til fjerning av nitrogen. BIOFOR er forkortelse for BIOlogical Filtration Oxygenated Reactor.

Som det går frem av navnet er det et



Figur 2. Skisse av pilotbiofor.

kombinert mekanisk og biologisk filter. Prinsippet er en kolonne fylt med filtermateriale av ekspanderte leirpartikler som biofilm vokser på, samtidig som suspendert stoff filtreres ut, nærmest som i et sandfilter. Vann og luft føres inn i bunnen av reaktoren og strømmer oppover gjennom filtermaterialet. Etterhvert som det akkumuleres slam i reaktoren, som følge av filtrering av suspendert stoff og biologisk vekst, oppstår et mottrykk over reaktoren. Dette registreres i meter vannsøyle ved hjelp av slanger tilknyttet reaktoren i ulike nivåer. Ved et på forhånd definert mottrykk igangsettes en kraftig gjennomspyling, såkalt prosessvask, som vasker ut det akkumulerte slammet.

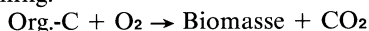
Den mekaniske filtreringen omfatter filtrering av suspendert stoff i innløpsvannet, og av biomassen som produse-

res i reaktoren. Det akkumulerte slammet fjernes med prosessvask. Frekvensen på prosessvasken vil bestemmes av belastningen av suspendert stoff og den biologiske veksten i reaktoren.

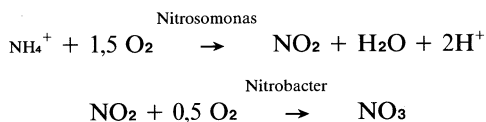
Filtermaterialet har betydning for effektiviteten i filtreringen av det suspenderte stoffet. Et filtermateriale bestående av store partikler slipper gjennom mer suspendert stoff enn små, men små partikler gir større spesifikt vekstareal for bakteriene. Imidlertid vil det ved bruk av små partikler være større risiko for gjentettig av reaktoren ved høy belastning av suspendert stoff. Hvorvidt filtermaterialet skal bestå av runde eller knuste partikler er ikke avgjort. Forsøk med utprøving av filtermedium for VEAS's avløpsvann er i gang i pilotskala.

Organisk omsetning og nitrifikasjon

Aerob organisk omsetning:



Nitrifikasjon:



Som det går frem av ligningene har disse prosessene et relativt høyt oksygenbehov. I nitrifikasjonen er det også produksjon av syre. Som følge av de nitrifiserende bakterienes sene vekstshastighet, vil de bli utkonkurrert i kampen om oksygenet. Derfor må den organiske omsetningen fullføres før nitrifikasjonen kan ta til.

Effekten av oksygen og syre på de biologiske prosessene er godt beskrevet i faglitteraturen. Målsettingen på VEAS er å optimalisere transporten av oksy-

gen til systemet og alkalisere vannet slik at prosessene kan gå upåvirket av syreproduksjonen i nitrifikasjonen. I dette ligger tekniske, biologiske og ikke minst økonomiske vurderinger.

Faktorer som har betydning for nitrifikasjon i BIOFOR

Biologisk og kjemisk sett er effekten av ulike parametre klart definert. Men i ulike biofilmsystemer vil graden av påvirkning av de ulike faktorene variere. De faktorene som er tatt med

her, har vist seg å ha størst betydning i BIOFOREN.

1. Oksygen/Lufttilsetning
2. Belastning av ammonium og organisk stoff
3. Hydraulisk belastning
4. pH/Alkalitet
5. Fosfor
6. Karakteristikk av bærematerialet
7. Biomassekonsentrasjon

Optimalisering

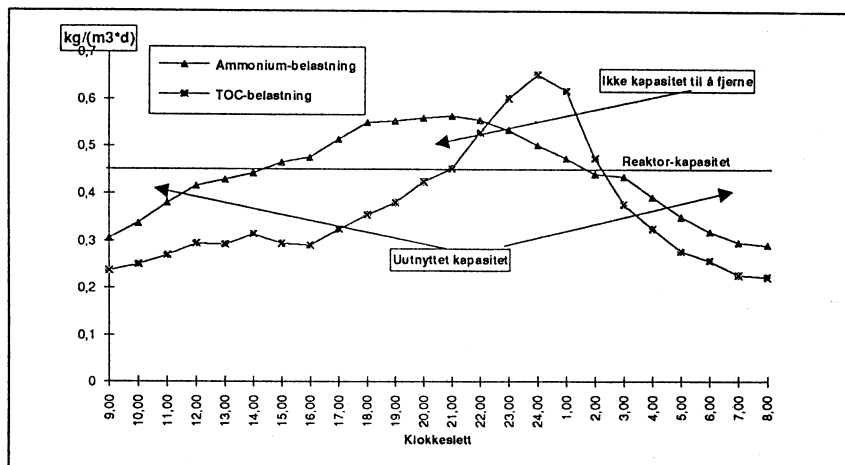
Etter 2 1/2 års drift begynner vi å kjenne dette systemet. Det videre arbeid vil konsentrere seg om å optimalisere prosessen, med hensyn til renseresultat og økonomi. Det er mest å tjene på optimalisering av lufttilførsel, alkalisering og utjevning av den hydrauliske belastningen.

1. Lufttilførsel: Oksygenbegrensning i reaktoren er dokumentert (3). På grunn av variasjoner i nitrogentilførselen, vil regulering av lufttilførselen være mer kostnadsoptimalt enn

konstant tilførsel. Det pågår for tiden et forsøk med å kartlegge oksygentransporten i reaktoren under ulike hydrauliske belastninger og ulike lufttilsetningsintensiteter.

2. Organisk omsetning: Effekten av den organiske omsetningen på nitrifikasjonen henger nøye sammen med oksygentilførselen i systemet. Det er blitt gjort forsøk for å se om den aerobe organiske omsetningen og nitrifikasjonen kunne foregå i samme reaktor, eller om de måtte separeres i to trinn (4). Resultatene viste at det mest kostnadsoptimale var å ha begge prosessene i samme reaktor. Denne beslutningen vil stille krav til effektiv oksygentransport til prosessen fra luften som tilføres.

3. Utjevning av den hydrauliske belastningen: Tilførselen av organisk karbon og nitrogen til VEAS varierer sterkt over døgnet. Som figur 3 viser et eksempel på, vil det i perioder på døgnet være så høy belastning av



Figur 3. Eksempel på belastningsvariasjoner av ammonium og organisk karbon.

karbon og nitrogen at reaktoren ikke vil ha kapasitet å omsette alt. I andre tider på døgnet er imidlertid belastningen mye mindre, slik at deler av reaktorene vil ha ledig kapasitet. Ved å jevne ut disse variasjonene kan reaktorens kapasitet utnyttes mest mulig effektivt.

Strategier for utjevning av ammoniumtilførslene til VEAS:

1. Regulering av interne kilder.
2. Regulere pumping av vann inn på anlegget.
3. Tiltak ved kildene.
4. Bruk av reservoarene i tunnel-systemet.

Regulering av den hydrauliske belastningen til anlegget har også betydning for oksygentransporten i reaktoren. Denne effekten gjør bildet mer komplisert, med tanke på optimalisering.

4. Alkalisering: En viss mengde alkalitet må tilføres for at nitrifikasjonen skal gå tilfredsstillende. Spørsmålet er hvor lav utløpsalkalitet en kan tillate uten å begrense prosessen. Utviklingen i arbeidet på VEAS har vært følgende:

FRA LITTERATUR: 1,5 meq/l (5)
DEGREMONT/VEAS: 1,0 meq/l (3)
FAN-PROGRAMMET: 0,7 meq/l (6)
P. SAGBERG, VEAS: 0,4 meq/l
(upublisert 1992)

Del III: DENITRIFIKASJON

$\text{Org.-C} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{Biomasse} + \text{N}_2 + \text{CO}_2$

Denitrifikasjon foregår i samme type reaktor som nitrifikasjon uten lufttilsetning, men med tilsetning av metanol som karbonkilde. Reaktoren er mindre, siden denne prosessen har vist seg å

være mer effektiv pr. volumenhet. Nitrifikkasjonen er den dominerende nitrogenforbindelsen etter nitrifikasjonen blir omdannet til atmosfærisk nitrogen av heterotrofe bakterier i fravær av løst oksygen.

Som formelen viser trenger prosessen organisk karbon. Det tilføres pr. idag i form av metanol, som er lett omsettbar. Det er imidlertid et mål å kunne produsere karbonkilde av slam, fordi metanol koster penger.

Denitrifikasjon ved bruk av metanol som karbonkilde har gitt gode resultater i forsøk på VEAS. Siden vannet har blitt filtrert i nitrifikasjonsreaktoren, vil belastningen av suspendert stoff på denitrifikasjonsreaktoren være liten, slik at akkumulering av slam i reaktoren vil komme fra biomasseproduksjon i denitrifikasjonen.

En viktig faktor i denitrifikasjonen er at oksygenet i det innkommende vannet må omsettes før denitrifikasjonen kan starte. Den prosessen krever karbon som den vil ta fra den tilførte metanolen. Dette kan utgjøre et stort ekstrabehov av metanol, slik at styring og minimalisering av oksygenkonsentrasjonen inn på denitrifikasjonstrinnet er en viktig oppgave. Med tanke på at nitrifikasjonen krever så mye oksygen, vil det her oppstå en konflikt mellom de to prosessene.

Problemet er da å løse hva som er mest kostnadsoptimalt:

Enten: Tilsette mest mulig oksygen for at nitrifikasjonen skal gå best mulig og få ekstra metanolkostnader,

Eller: Tilsette noe mindre oksygen med de følger det får for nitrifikasjonen, men dermed spare utgifter til metanol.

Sannsynligvis vil løsningen på problemet bli et kompromiss mellom de to alternativene.

Del IV: SLAMBEHANDLING

Målsettingen med slambehandlingen er blant annet produksjon av karbon til denitrifikasjon, for å redusere metanol-kostnadene. Det vil også redusere det totale slamvolum som produseres på VEAS.

Prosessen består av biologisk hydrolyse og termisk behandling. Produktet av denne prosessen, *hydrolysatet*, må være lett omsettbart, slik at det kan utnyttes i denitrifikasjonen i løpet av den korte tiden vannet er i reaktoren.

Hvis hydrolysatet inneholder for mye tungt nedbrytbart karbon vil dette medføre høye utslipp av karbon. Innholdet av nitrogen er av betydning for kvaliteten på hydrolysatet, siden et høyt nitrogeninnhold bidrar til redusert renseggrad.

Biologisk hydrolyse alene, og i kombinasjon med termisk behandling er prøvd på VEAS. Utbyttet av disse prosessene var høyt, men det foreligger ikke resultater enda om hvor anvendbart dette var i denitrifikasjonen.

Referanser

1. NIVA 1986. Vurdering av Oslofjorden. Rapport O-086166.
2. Ministerial Declaration. Second international conference on the protection of the North Sea. London, november 1987.
3. Ydstebø, L.: Tilsetning av oksygenriket luft i nitrifikasjonsprosessen. FoU-Rapport 2-10, 1992.
4. Tandberg, I.: Simultan eller separat karbonfjerning og nitrifikasjon. FoU-Rapport 2-05, 1992.
5. Siegrist H. & Gujer, W.: Demonstration of mass transfer and pH effects in a nitrifying biofilm. *Water res.*, Vol. 21, no 12, pp. 1481—1487, 1987.
6. Rusten, B.: Pilot-forsøk med nitrogenfjerning ved Nordre Follo kolakkverk. II. Etterdenitrifisering med dykket biologisk filter, Rapport FAN-programmet 1992.