

Effektiv nitrogenfjerning med ny norsk biofilmprosess

Av Bjørn Rusten

Forfatteren er dr.ing. og ansatt i Aquateam - Norsk vann-
teknologisk senter A/S. Han er i tillegg Professor II ved NTH

SAMMENDRAG

En helt ny og meget lovende biologisk renseprosess har de siste årene blitt utviklet av NTH/SINTEF i samarbeid med Kaldnes Miljøteknologi A/S (KMT). Prosessen omtales som KMT-prosessen og den benytter seg av en film av mikroorganismer (biofilm) som vokser på små plastelementer. Plastelementene har en tetthet i underkant av 1 g/cm^3 og holdes i suspensjon på grunn av turbulens forårsaket av luftere eller omrørere i reaktorene. Et høyt spesifikt biofilmareal gjør at man kan bygge meget volumeffektive biologiske renseanlegg.

Tallrike forsøk har vist at KMT-prosessen er velegnet for å fjerne nitrogen fra både typisk norsk avløpsvann og mere kontinentale avløpsvannstyper. Prosessen er meget fleksibel og med KMTs teknologi kan f.eks. aktivslambasseng eller andre ledige bassengvolum på en enkel måte konverteres til nitrogenfjerningsanlegg. KMTs biofilmreaktorer kan bygges for for-denitrifisering, etterdenitrifisering eller kombinert for- og etterdenitrifisering. Med etterdenitrifisering har en to-

tal hydraulisk oppholdstid i bioreaktorene på bare 2,5-3 timer vist seg å være tilstrekkelig for å oppnå $\geq 85\%$ nitrogenfjerning.

SUMMARY

A new and very promising process for biological treatment of wastewater has recently been developed by the Norwegian Institute of Technology/SINTEF in cooperation with Kaldnes Miljøteknologi A/S (KMT) in Tønsberg, Norway. This so-called Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) process uses small plastic element carriers for growth of fixed microorganisms. The carrier elements have a density slightly below 1 g/cm^3 and they are kept in suspension by the turbulence created by aerators or mixers in the reactors. A high specific biofilm surface area makes the MBBR process very volume efficient.

Numerous tests have shown that the MBBR process is suitable for nitrogen removal from both typical Norwegian wastewater and typical continental wastewater. The process is very flexible and with the MBBR technology activated sludge basins or other vacant

basins can easily be upgraded or converted to nitrogen removing treatment plants. MBBRs can be constructed for pre-denitrification, post-denitrification or combined pre- and post-denitrification. With post-denitrification a total empty bed hydraulic retention time in the bioreactors of only 2.5 - 3 h has been sufficient for $\geq 85\%$ total nitrogen removal.

INNLEDNING

En helt ny og meget lovende biologisk renseprosess har de siste årene blitt utviklet av NTH/SINTEF, i samarbeid med Kaldnes Miljøteknologi A/S (KMT) i Tønsberg. Prosessen, som er patentert, benytter seg av små plastelementer med en tetthet i underkant av 1 g/cm^3 . Plastelementene svever rundt i vannfasen på grunn av den turbulensen som skapes av luftere eller omrørere i reaktorene. En film av mikroorganismer (biofilm) vokser på plastbitene. Biofilmarealet kan reguleres opp til et effektivt areal på maksimalt $350 \text{ m}^2/\text{m}^3$ reaktorvolum, avhengig av hvor mange plastbiter man fyller i reaktorene. Dette høye spesifikke biofilm-arealet gjør at man kan bygge meget volumeffektive biologiske renselanlegg. Internasjonalt er prosessen kjent som "Moving Bed Biofilm Reactor Process", mens den i Norge ofte omtales som KMT-prosessen.

KMT-prosessen har oppnådd gode resultater ved rensing av både industrielt og kommunalt avløpsvann. Etter grundige pilot-forsøk med forskjellige typer avløpsvann er nå 14 fullskala anlegg i drift og flere er under bygging.

Nitrogenfjerning har stått i fokus på kommunalsektoren de siste årene. KMT-prosessen har vist seg velegnet for biologisk nitrogenfjerning. På grunn av sin volumeffektivitet vil den f.eks. gjøre det mulig å konvertere konvensjonelle biologisk/kjemiske aktivslamanlegg til nitrogenfjerningsanlegg, uten utvidelse av eksisterende bassengvolum.

Med offentlig finansiering (fra SFT, MD, Norges forskningsråd, Eksporrådet og Industrifondet) har Aquateam deltatt i omfattende utprøvinger av KMT-prosessen for nitrogenfjerning. Forsøksdriften har foregått i flere land, i både laboratorie-, pilot- og fullskalanlegg. Resultatene fra disse utprøvingene har vært (eller vil bli) fyldig presentert i internasjonal faglitteratur /2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11/. Et sammendrag vil bli presentert i denne artikkelen.

NITROGENFJERNING MED KMT-REAKTORER

Ved biologisk nitrogenfjerning må avløpsvannet først *nitrifiseres* og deretter *denitrifiseres*. Ved nitrifisering omdannes ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) til nitrat ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) under aerobe forhold. Ved denitrifisering reduseres $\text{NO}_3^-\text{-N}$ til inert N_2 -gass, som unnviker til atmosfæren. Denitrifiseringsprosessen foregår under anoksiske forhold (fravær av oksygen) og den trenger organisk stoff, som enten kan tas fra avløpsvannet eller tilføres som en ekstern karbonkilde. Nitrifiserings- og denitrifiseringsprosessene kan kombineres på mange forskjellige måter. Nitrogenfjerning med

KMT-reaktorer har vært undersøkt med de fem prosessvariantene som er vist i flytskjemaet i figur 1. Typiske resultater for oppnådd nitrogenfjerning framgår av tabell 1. Tabellen viser også tilhørende verdier for totale hydrauliske oppholdstider i bioreaktorene, tilførsel av eksternt karbonkilde og resirkuleringsforhold. Valg av prosessvariant vil være avhengig av råvannets sammensetning og tilgjengelige bassengvolum på renseanlegget.

Fordenitrifisering

Lav temperatur og lavt innhold av biologisk lett nedbrytbart organisk materiale er typisk for norsk avløpsvann. Dette gjør det vanskelig å oppnå høy nitrogenfjerning. Ved fordenitrifisering med ubehandlet avløpsvann (prosess a) har man oppnådd 50-70% nitrogenfjerning med resirkuleringsforhold fra 1 til 3. På grunn av det lave innholdet av lett nedbrytbart organisk materiale, vil høyere resirkuleringsforhold føre til dårligere renses effekter /5/.

Fordenitrifisering med forsedimentert avløpsvann (prosess b) har blitt testet i Spania /3/. Sammenlignet med norsk avløpsvann, hadde dette avløpsvannet høyere temperatur og et mye høyere innhold av biologisk lett nedbrytbart organisk materiale. Avløpsvannet var derfor velegnet for fordenitrifisering og 75% nitrogenfjerning ble oppnådd ved en total hydraulisk oppholdstid på 6 timer og et resirkuleringsforhold på 4. Avløpsvannets sammensetning i Spania er representativt for det meste av Europa, med unntak av Norge og noen av de andre nordiske landene.

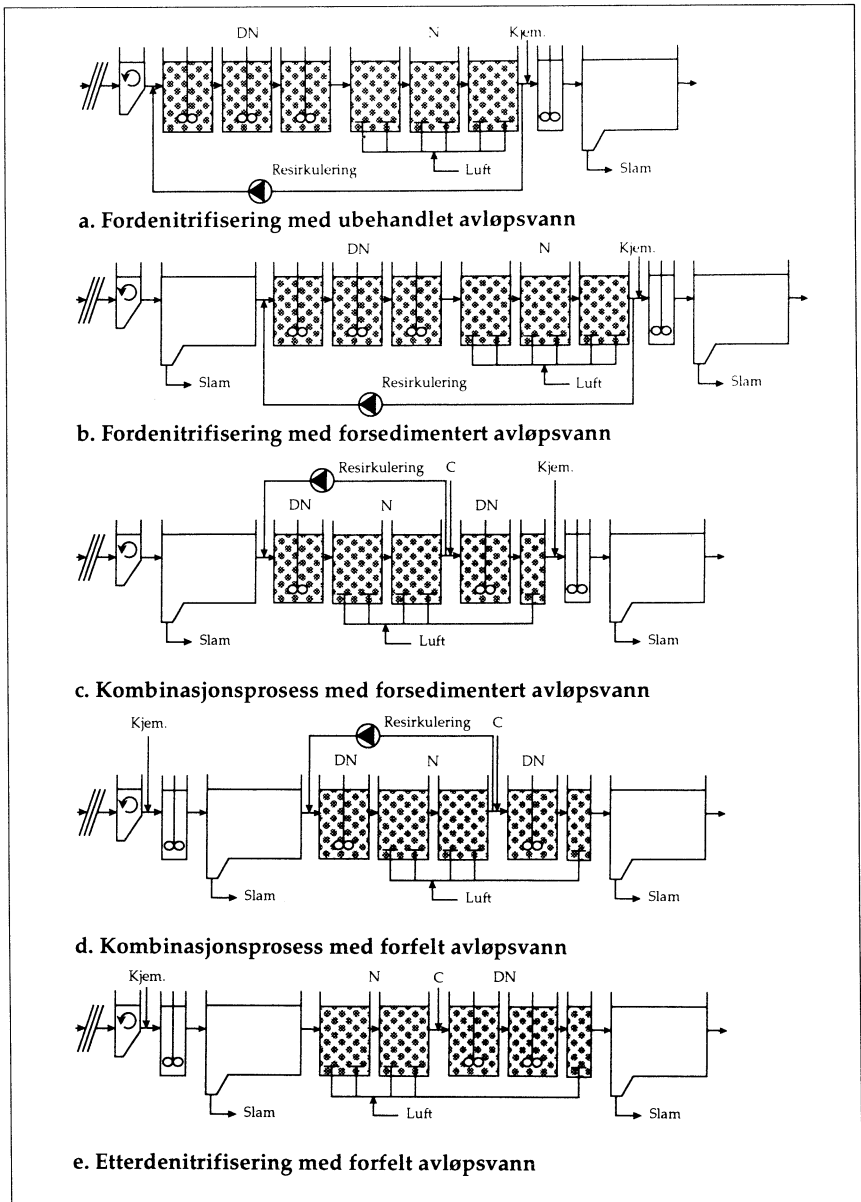
Ingen tilførsel av kjemikalier er nødvendig ved fordenitrifisering med KMT-reaktorer.

Kombinasjonsprosess

Kombinasjonsprosessen (med både fordenitrifisering og etterdenitrifisering) har blitt tatt i bruk fordi norsk avløpsvann har en sammensetning som gjør det vanskelig å klare over 70% nitrogenfjerning uten støttedosering av en eksternt karbonkilde. Metanol er den mest brukte eksterne karbonkilden.

Kombinasjonsprosessen med forsedimentert avløpsvann (prosess c) har blitt testet i et pilot-anlegg ved Bekkelaget renseanlegg i Oslo /7/. Denne prosessen trenger som før nevnt noe eksternt karbon, men det har ikke vært behov for tilsetning av hverken skumdempningsmidler eller alkaliseringsmidler. Med en total hydraulisk oppholdstid på 3,5-4 timer og resirkuleringsforhold på 0,5-1,5 ble det oppnådd $\geq 80\%$ nitrogenfjerning.

Med forfelt avløpsvann har kombinasjonsprosessen (prosess d) blitt testet i forsøkshallen på NTH /8/ og i pilot-anlegget ved Bekkelaget renseanlegg /1/. Lufting av kjemisk rensert (forfelt) avløpsvann fører normalt til store skummingsproblemer og behov for tilsetning av skumdemper. Kombinasjonsprosessen med forfelt avløpsvann har imidlertid blitt kjørt uten at det ble behov for skumdemper. Sannsynligvis har potensialet for problematisk skumdannelse blitt redusert ved at vannet passerte en anoksisk sone, før det kom til den første av de luftede reaktorene. Forfellingen ble utført med relativt lave



Figur 1: Aktuelle prosesskombinasjoner for nitrogenfjerning med KMT-reaktorer. Anleggene fjerner også fosfor.

C= ekstern karbonkilde, DN =denitrifisering, N=nitrifisering

**Tabell 1. Nitrogenfjerning med KMT-reaktorer.
Typiske erfaringer med forskjellige prosessvarianter (se figur 1).**

Prosess	Nitrogenfjerning, %	*Hydraulisk oppholdstid, timer	Tilførsel av eksternt C-kilde, g COD/g TN i råvann	Resirkuleringsforhold $r = \frac{Q_{Resirk}}{Q_{Inn}}$	** Størrelse på forsøksanlegg	Referanse
a) Fordenitrifisering med ubehandlet avløpsvann	50-70	6-7	0	1-3	P + F	4, 5, 9
b) Fordenitrifisering med forsedimentert avløpsvann	75	6	0	4	P	3
c) Kombinasjonsprosess med forsedimentert avløpsvann	>80	3,5 - 4	2,9	0,5 - 1,5	P	7, 8
d) Kombinasjonsprosess med forfelt avløpsvann	> 80	3,0 - 3,5	3,2	0,2 - 0,5	L + P	1, 8
e) Etterdenitrifisering med forfelt avløpsvann	> 85	2,5 - 3	4,7	0	P + F	4, 5, 6

* Basert på brutto reaktorvolum og Q_{Inn}

** L = laboratorieskala, P = pilot-anlegg, F = fullskala-anlegg

doser av forskjellige typer PAX. Disse fellingskjemikaliene forbruker lite alkalitet, og tilførsel av kjemikalier for pH-justering i KMT-reaktorene var ikke nødvendig. Med totale hydrauliske oppholdstider på 3,0-3,5 timer ble det oppnådd $\geq 80\%$ nitrogenfjerning. På grunn av lave resirkuleringsforhold og det faktum at forfelling fjerner en del kolloidalt organisk materiale, trenger kombinasjonsprosessen en noe høyere tilførsel av eksternt karbon når avløpsvannet er forfelt enn når avløpsvannet bare er forsedimentert.

Etterdenitrifisering

Ved etterdenitrifisering (prosess e) ønsker vi en best mulig forfelling for å redusere den organiske belastningen på de aerobe reaktorene. Denne prosessen egner seg best når man har tynt avløpsvann, liten andel biologisk lett nedbrytbart materiale og lave temperaturer, samtidig som man ønsker en høy grad av nitrogenfjerning. Etterdenitrifisering av forfelt avløpsvann har blitt grundig undersøkt i pilot-skala ved Nordre Follo renseanlegg /4, 5/ og i fullskala ved Bekkelaget renseanlegg /6/. Disse forsøkene har vist at man klarer minst 85% nitrogenfjerning ved totale hydrauliske

oppholdstider på 2,5-3 timer og med en typisk tilførsel av eksternt karbonkilde på 4,7 g COD/g TN i råvannet. Dette er et lavt forbruk av eksternt karbonkilde, sammenlignet med forbruket ved etterdenitrifisering med andre biofilm-prosesser /5/.

Forfellingen ble utført med AVR på Nordre Follo renseanlegg og jernklorid på Bekkelaget renseanlegg. Disse kjemikaliene forbruker så mye alkalitet at det var nødvendig med kalking av det forfelta avløpsvannet for å holde tilstrekkelig høye pH-verdier i KMT-reaktorene. Ved oppstart ble det brukt store mengder skumdemper på Bekkelaget renseanlegg. Skumdemperforbruket ble imidlertid gradvis redusert, etterhvert som vi fikk en "moden" biofilm i KMT-reaktorene. Det er normalt at det kan ta ca. 1 år før en biofilmprosess for nitrogenfjerning er ferdig innkjørt. Forsøkene på Bekkelaget varte ca. 1 år og på slutten ble anlegget kjørt i lengre perioder helt uten tilsetning av skumdemper.

Fullskala-forsøkene på Bekkelaget renseanlegg ble utført ved at ett av aktivslambassengene ble bygd om til et KMT-anlegg. Belastningen på KMT-anlegget tilsvarte opptil 20.000 person-ekvivalenter. Tabell 2 illustrerer de re-

Tabell 2. Nitrogenfjerning med KMT-reaktorer på Bekkelaget renseanlegg. Total hydraulisk oppholdstid: 2,6 timer.

	Gjennomsnitt	Maks.	Min.
Forfelt avløpsvann, g TN/m ³	24,0	31,0	19,8
Renset avløpsvann, g TN/m ³	3,5	5,6	1,3
Nitrogenfjerning, %	86	94	82

sultatene som ble oppnådd i KMT-anlegget når forfelling på hovedanlegget fungerte tilfredsstillende /6/. Vi ser at det ble oppnådd gjennomsnittlig 86% nitrogenfjerning over KMT-anlegget, ved en total hydraulisk oppholdstid på bare 2,6 timer.

REFERANSER

1. Hem, Lars J. og Rusten, Bjørn (1993): Pilotforsøk med forfelling og kombinert for- og etterdenitrifikasjon i KMT-reaktorer. Rapport 93-020, Aquateam A/S.

2. Hem, Lars; Rusten, Bjørn and Ødegaard, Hallvard (1994): Nitrification in a Moving Bed Biofilm Reactor. Water Research, Vol.28, No.6, pp.1425-1433.

3. Montoya, Amparo y Rodrigo, Juan Carlos (1994): Proceso KMT de biomasa fija sobre lecho móvil. Experiencias en planta piloto en España. *Technologia Del Agua*, Año XIV, Num.121, Marzo, pp.43-50.

4. Rusten, Bjørn; Hem, Lars and Ødegaard, Hallvard (1994): Nitrification of Municipal Wastewater in Moving Bed Biofilm Reactors. Accepted for publication in "Water Environment Research".

5. Rusten, Bjørn; Hem, Lars and Ødegaard, Hallvard (1994): Nitrogen Removal From Dilute Wastewater in Cold Climate Using Moving Bed Biofilm Reactors. Accepted for publication in "Water Environment Research".

6. Rusten, Bjørn; Siljudalen, Jon G. and Nordeidet, Bjørnar (1993): Upgrading to nitrogen removal with the KMT moving bed biofilm process. Proceedings, 2nd International Specialized Conference on Upgrading of Wastewater Treatment Plants, Berlin, Germany, Sept.21 -24, pp.213-222.

7. Wien, Asgeir (1992): Nitrogenfjerning med kombinert for- og etterdenitrifisering i et biofimanlegg som behandler forsedimentert avløpsvann. Hovedoppgave, D1-1992-14, Inst. for vassbygging, NTH.

8. Ødegaard, Hallvard and Rusten, Bjørn (1993): Norwegian Experiences with Nitrogen Removal in a Moving Bed Biofilm Reactor. Proceedings, 9th EWPCA-ISWA Symposium, Munich, May 11 -13, pp.205-221.

9. Ødegaard, Hallvard; Rusten, Bjørn and Badin, Henrik (1993): Small wastewater treatment plants based on moving bed biofilm reactors. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 28, No. 10, pp. 351 -359.

10. Ødegaard, Hallvard, Rusten, Bjørn and Hem, Lars (1991): Nitrogen Removal in a Moving Bed Biofilm Reactor. Proceedings, 4. Fachtagung Weitergehende Abwasserreinigung als Beitrag zum Schutz von Nord- und Ostsee, Lübeck, Nov.

11. Ødegaard, Hallvard; Rusten, Bjørn and Westrum, Thorbjørn (1993): A new moving bed biofilm reactor - Applications and results. Proceedings, IAWQ Second International Conference on Biofilm Reactors, Paris, Sept. 29 - Oct. 1, pp. 221-229.