

Biologiske forhold og prosesser i vann

Av Kari Ormerod

Kari Ormerod er siv.ing. fra NTH 1958, linje for teknisk biokjemi. Hun er seksjonsleder på NIVA.

I vann kan det foregå utallige biologiske prosesser. For lettere å forklare hovedgangen i disse prosessene, er et svært forenklet system skissert på figur 1.

I næringsrike innsjøer og marine områder vil det etter hvert danne seg et sedimentlag ved bunnen, bestående av partikulært organisk materiale. Dette materialet blir dannet ved at døde dyr og planter i vannet synker til bunns. Også tilført partikulært organisk stoff, slik som løv fra trær om høsten, oppslemmet jord i smeltevann eller avrenningsvann etter regnskyll, og partikler i industriavløpsvann kan bidra til å danne sedimenter. I rennende vann vil strømningsforholdene være avgjørende for om det dannes sedimenter eller ikke.

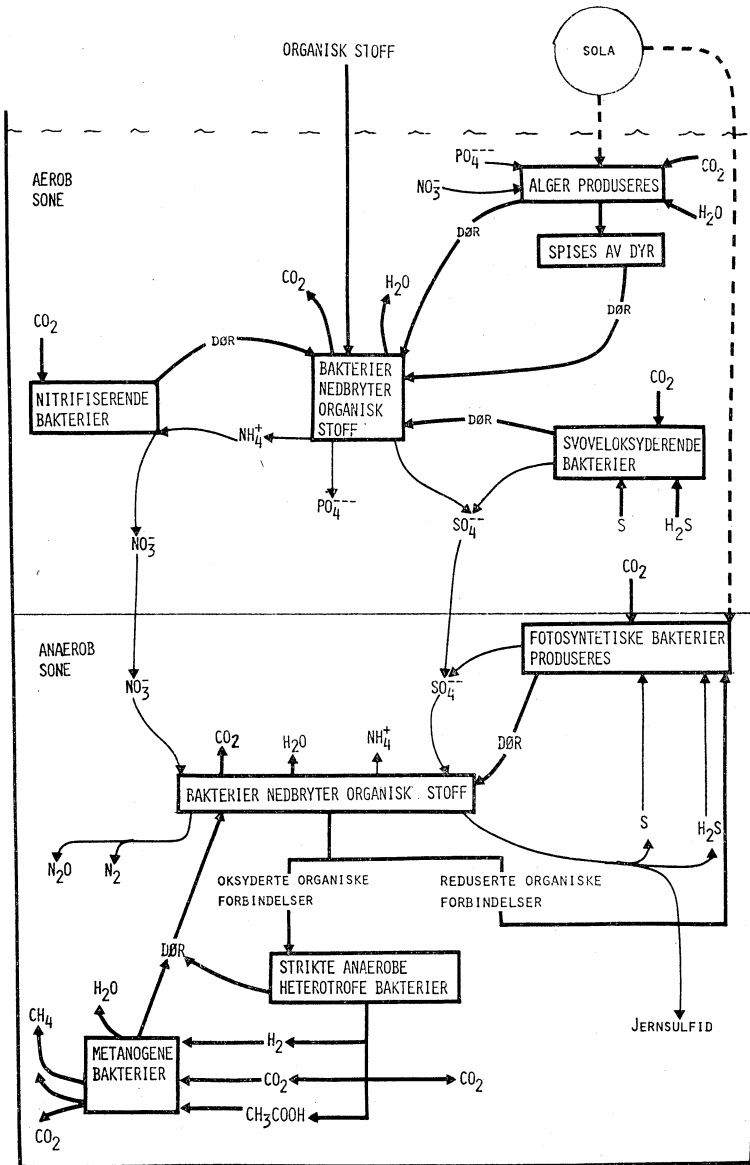
Bakterier, sopp og dyr som finnes i vannet vil finne næring i det organiske stoff i sedimentene, og de begynner å «spise» av stoffet. Slike organismer kaller vi med en fellesbetegnelse «heterotrofe» organismer eller «dekomponenter». Vi kaller dem dekomponenter fordi de spiser det organiske stoff og omdanner det til karbondioksyd, vann og eventuelt uorganiske salter, samtidig som de selv øker i antall. Det organiske stoff blir brukt både til energi og som byggestener til å danne nye individer, akkurat som hos menneskene. Slike organismer kaller vi heterotrofe organismer. Man regner grovt med at 10% av det organiske stoff gjenvinnes som

nye individer, mens 90% blir brukt til energi. Det stoffet som ikke blir til nye individer blir oksydert så langt det går. Er det nok oksygen til stede, går alle hydrogenatomer til vann, H_2O , og alle karbonatomer til karbondioksyd, CO_2 . Inneholder det organiske stoffet svovel og nitrogen, blir disse frigjort som sulfat, SO_4^- , og ammonium, NH_4^+ . Ammonium kan oksyderes videre til nitrat, NO_3^- . Fosfor blir frigjort som fosfater, PO_4^{3-} .

Er det meget stor nedbrytningsaktivitet i sedimentene, kan det hende at organismene bruker opp alt oksygenet i sedimentene. Dersom det molekylære oksygen i de ovenforliggende vannmasser ikke rekker å diffundere ned fort nok, kan sedimentene og en del av de ovenforliggende vannmasser bli helt fri for oksygen. Det oppstår oksygensvikt, og vi har å gjøre med «anaerobe» vannmasser og sedimenter. Vann og sedimenter som inneholder oksygen kaller vi «aerobe».

På figur 1 er en vannmasse illustrert som en åpen boks med en aerob og en anaerob sone. Den anaerobe sone er vanligvis ikke så stor, her er den laget stor bare for å gi plass til beskrivelse av prosessene.

De prosesser som er beskrevet foran for sedimentene kan også foregå i de frie vannmasser. Oppløst organisk stoff blir omsatt av bakterier i vannmassene. Dødt partikulært materiale som holder seg



Figur 1. Skjematisk fremstilling av bakteriologiske prosesser i en innsjø.

flytende blir nedbrudt av bakterier og sopp som fester seg til partiklenes overflate (1).

Vi skal nå se på de prosessene som er beskrevet på figur 1.

Både partikulært og oppløst organisk stoff kan tilføres vannmassene utenfra, både fra naturen og fra avløpsvann produsert av mennesker. I tillegg til dette kan det produseres organisk stoff i selve vannmassene. To typer organismer er involvert i denne produksjonen, nemlig planter og bakterier. Av disse er plantene de viktigste, fordi de kan vokse under de fleste forhold og derfor utgjør det meste av det organiske stoff som produseres i vannet. Det kan være planter som har sine røtter på bunnen og den fotosyntetiserende del over vann (siv, vannliljer), de kan ha røttene på bunnen og vokser helt nede i vannet, som *Elodea canadensis* (vannpest), de kan flyte i vannskorpa med «røttene» nede i vannet, som *Lemna minor* (andemat), eller de kan være planter uten røtter som vokser fastsittende på bunnen (benthiske alger) eller fritt-svevende i vannmassene (planktoniske alger). Alle disse plantene tar sin energi fra sollyset, bruker karbondioksyd som karbonkilde og vann som hydrogenkilde til bygging av nye celler. Derfor blir sluttresultatet at vannmassene får et tilskudd av organisk stoff. Dyr i vannmassene spiser av disse plantene, større dyr spiser de mindre dyrene, og vi mennesker fanger og spiser fisken. For hvert ledd må 90% av det organiske stoffet nedbrytes for at 10% skal kunne bli til nye dyr, og denne nedbrytningen krever oksygen. Da alle planter bruker vann (H_2O) som hydrogenkilde i fotosyntesen, blir et halvt molekyl oksygen frigjort for hvert vannmolekyl som spaltes. Oksygenet frigjøres som gass

slik at denne type fotosyntese tilfører oksygen til vannmassene.

I den aerobe sone på figur 1 kan vi se at *nitrifiserende* bakterier oksyderer ammoniumsforbindelser til nitrat. Disse bakteriene er ikke heterotrofe, de trenger ikke organisk stoff til energikilde. De benytter karbondioksyd som karbonkilde for nye byggestener, slik som algene, men de benytter oksydasjon av ammonium og nitritt som hydrogen- og energikilde. Her blir det altså også produsert nytt organisk stoff i vannet. Det er flere liknende typer av slike bakterier i de aerobe vannmasser:

De *svoveloksyderende bakterier* (*Thiobacillus*, *Beggiatoa*, *Thiothrix*) som oksyderer reduserte svovelforbindelser til sulfat, og de *jern- og mangan oksyderende bakterier* (*Gallionella*, *Ferrobacillus*, *Lepthothrix*, *Metallogenium*) som får sin energi fra oksydasjon av reduserte jern- og manganforbindelser. Det er imidlertid ikke helt avklart om alle de jern- og manganoksyderende bakteriene greier seg uten tilførsel av organisk stoff for å danne nye individer.

Enda en type bakterier er med på å produsere organisk stoff i vannet. Disse bakteriene benytter også sollys til energikilde, men de tar ikke hydrogenatomer fra vann til reduksjon av CO_2 (produksjon av organisk stoff) slik som algene, og de produserer derfor heller ikke oksygen. De krever helt spesielle forhold for å kunne utvikle seg. Prosessen er tegnet inn i den anaerobe sone på figur 1. Disse bakteriene tåler nemlig ikke oksygen, så betingelsen for at de skal vokse er at sollyset trenger helt ned til den anaerobe sone. Bakteriene har spesialisert seg på å vokse ved lys av de bølgelengder som trenger lengst ned i vannet. Lys og anaerobe forhold er imidlertid ikke nok

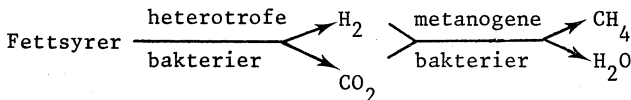
for dem. Det finnes to hovedtyper av disse bakteriene. Den ene typen benytter reduserte svovelforbindelser som hydrogen- (eller elektron-) donor f.eks. *Chlorobium* som er grønn, og *Thiopedia* som er rød av farge. Den andre typen benytter lavmolekylært redusert organisk stoff som hydrogen donor, f.eks. den rødfargede *Rhodospirillum*. Noen av disse fotosyntetiserende bakteriene kan også benytte organisk stoff som byggestener, men da de ikke benytter organisk stoff til energikilde blir resultatet at mengden organisk stoff i sjøen heller øker enn reduseres når de formerer seg.

Men, hvor får de så lavmolekylært, redusert organisk stoff og reduserte svovelforbindelser fra? Jo, det produseres i den anaerobe sone som et resultat av at organisk stoff nedbrytes også der. Nedbrytningsprosessen stopper nemlig ikke selv om alt molekylært oksygen forsvinner fra vannet. Det finnes bakterier som kan ta oksygen fra sulfater og nitrater når de slipper opp for molekylært oksygen. Oksygenet trenger de til å danne karbondioksyd av karbonatomene og vann av hydrogenatomene fra den delen av det organiske stoff som skaffer dem energi. Disse bakteriene er egentlig innrettet på å benytte *molekylært oksygen*, men i tillegg kan de benytte *uorganisk bundet oksygen*. Under denne prosessen blir det dannet hydrogen sulfid, H_2S , av sulfater,

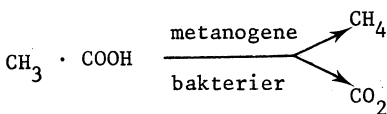
og lystgass, N_2O , eller molekylært nitrogen, N_2 , av nitrater. Den siste prosessen kalles *denitrifisering*. Hydrogensulfid er en giftig gass for aerobe organismer, og kommer den opp i de aerobe vannmasser kan f.eks. fisk dø. Dette kan skje i meget næringsrike sjøer under isen om vinteren, eller under sirkulasjonsperioden.

Det finnes også bakterier som greier seg helt uten noen form for oksygen. De nedbryter det organiske stoffet ved å spalte det opp i mindre og mindre enheter, slik at det blir dannet lavmolekylære syrer (fettsyrer), CO_2 , H_2O , og lavmolekylære aldehyder og alkoholer. De to førstnevnte er oksyderte, og de tre sistnevnte reduserte forbindelser. Disse lavmolekylære organiske stoffene blir raskt nedbrutt hvis vannmassene blir tilført oksygen igjen. Hvis ikke, vil de reduserte forbindelsene bli værende der om ikke fotosyntetiserende bakterier er til stede.

Fettsyrene kan imidlertid nedbrytes videre dersom miljøet blir redusert nok til at de *metanogene* bakterier blir aktive. Fettsyrene spaltes da videre til hydrogen-gass og karbondioksyd. Denne reaksjonen er imidlertid avhengig av at hydrogen-gassen fjernes, og her kommer de *metanogene* bakterier inn i bildet, da disse kan produsere metan og vann fra hydrogen og karbondioksyd:



Metan kan også dannes ved direkte splitting av acetat:



Mekanismene for metanproduksjon er blitt inngående studert i forbindelse med studiet av de prosesser som foregår i magesekkene hos drøvtyggere. I drøvtyggermager foregår det meste av metanproduksjonen ved reaksjon mellom hydrogengass og carbondioksyd.

I råtnetanker for kloakkslam er det funnet at den andre prosessen dominerer, ca. 2/3 av metanproduksjonen foregår ved splitting av acetat.

I anaerobe sedimenter og vannmasser ser det ut som om begge prosesser kan forekomme, men dette er ikke så inngående studert som de to foran nevnte eksempler.

Bobler som stiger til overflaten i sterkt forurenset vann består av metan. Denne gassen er luktløs og brenner hvis den antennes. Dannet hydrogensulfid løser seg i vann og reagerer gjerne med metallioner og danner sulfider. Svart bunnslam består således for størstedelen av jernsulfid. Gassen hydrogensulfid lukter som råtnete egg, og da den kan føres til vannoverflaten sammen med metangass, kan dette føre til luktplager i omgivelsene. I saltvann fører utslipp av organisk stoff lett til produksjon av hydrogensulfid, fordi vannets innhold av sulfat forsyner bakteriene med oksygen etter at det molekylære oksygen er oppbrukt. Dette har skapt store problemer der kloakkvann har vært ledet ut i marine områder i sementrør (2). Nedbrytning av organisk stoff fører til anaerobe forhold og stor hydrogensulfidproduksjon ved bunnen av rørledningen. Gassen stiger opp i luftlaget i den del av røret som ikke er fylt av vann. I denne delen etablerer det seg svoveloksyderende bakterier. Disse produserer svovelsyre som tærer istykker sementrøret. Også i sulfatrikt grunnvann

kan det oppstå problemer med produksjon av hydrogensulfid.

En mer nøyaktig og detaljert beskrivelse av alle de nevnte prosesser og mikroorganismer kan studeres i lærebøker i mikrobiologi, f.eks. i «Bacterial Metabolism» av Doelle (3). Boken av Brock (4) er også interessant å lese, da den inneholder mange fine illustrasjoner.

Det vanligste er imidlertid at vannmassene både i sjøer og i havet er aerobe. Vi skal se litt nærmere på de bakterier og sopper som hører hjemme i de aerobe vannmasser. Noen slike mikroorganismer synes å være til stede både i saltvann og ferskvann, mens andre bare kan leve i den ene eller andre vanntype. Bakterien *Pseudomonas fluorescens* er en bakterietype som synes å finnes overalt der det er organisk stoff å finne. De bakterier som har sin oppblomstringsperiode når saltvann inndampes til salt i «saltsjøer», er ekstremt saltelskende (halofile) og sprekker hvis de kommer ut i vanlig havvann. Fotosyntetiserende bakterier liker seg godt i grunne salt- og brakkvannsområder. De kan ligge som et rødt teppe over råtnende alger, som nedbrytes av heterotrofe og sulfatreduserende bakterier. De kan også danne tette, fargede sjikt helt øverst i de anaerobe vannmasser i ferskvann og saltvann.

Sovjetrussiske forskere begynte ganske tidlig å studere de mikroorganismer som fantes ute i verdenshavene, fra overflatesjiktet til de store havdyp (5). Forskere i vestlige land har også tatt opp studiet av marine bakterier (6). Det ser ut som om nedbrytning av organisk stoff går svært langsomt på de store havdyp. En liten forsknings-undervannsbåt sank ved et uhell ned til meget store havdyp utenfor østkysten av USA, men ble tatt opp igjen vel 10 måneder senere. Mat-

pakkene til forskerne hadde ligget i vann inne i forskningsfartøyet i alle disse månedene, men maten var nesten ikke forandret, og noen epler var helt som nye. (7). Disse forskerne begynte å undersøke dette, og fant at nedbrytningen gikk 10—100 ganger saktere ved store havdyp enn i tilsvarende prøver som ble inkubert ved samme temperatur i laboratoriet.

Imidlertid er det ferskvann vi mennesker bruker mest i vårt daglige liv, så vi skal derfor se litt nærmere på de heterotrofe mikroorganismer som finnes der. I den senere tid har det vært utført undersøkelser av hvilke bakterier det er vanlig å finne i ferskvann. Undersøkelser utført i en eutrof innsjø i Norge (8) ser ut til å stemme bra overens med undersøkelser utført i en liknende innsjø i USA (9). I begge tilfeller ble følgende bakterietyper funnet: Orange *Flavobacterium-Cytophaga*-bakterier, gule *Flavobacterium-Cytophaga*-bakterier, *Vibrio*-liknende bakterier og *Pseudomonas*-liknende bakterier. I den norske innsjøen dominerte de små *Vibrio*-liknende bakteriene mengdemessig sett over hele året, mens de orange og gule bakterier og enkelte *Pseudomonas*-typer så ut til å følge oppblomstringen av alger. I elven Donau er det rapportert merkbart økning av slike gule *Cytophaga*-bakterier i sukkerroesongen, da avløpsvann fra denne industrien slippes ut i elven (10).

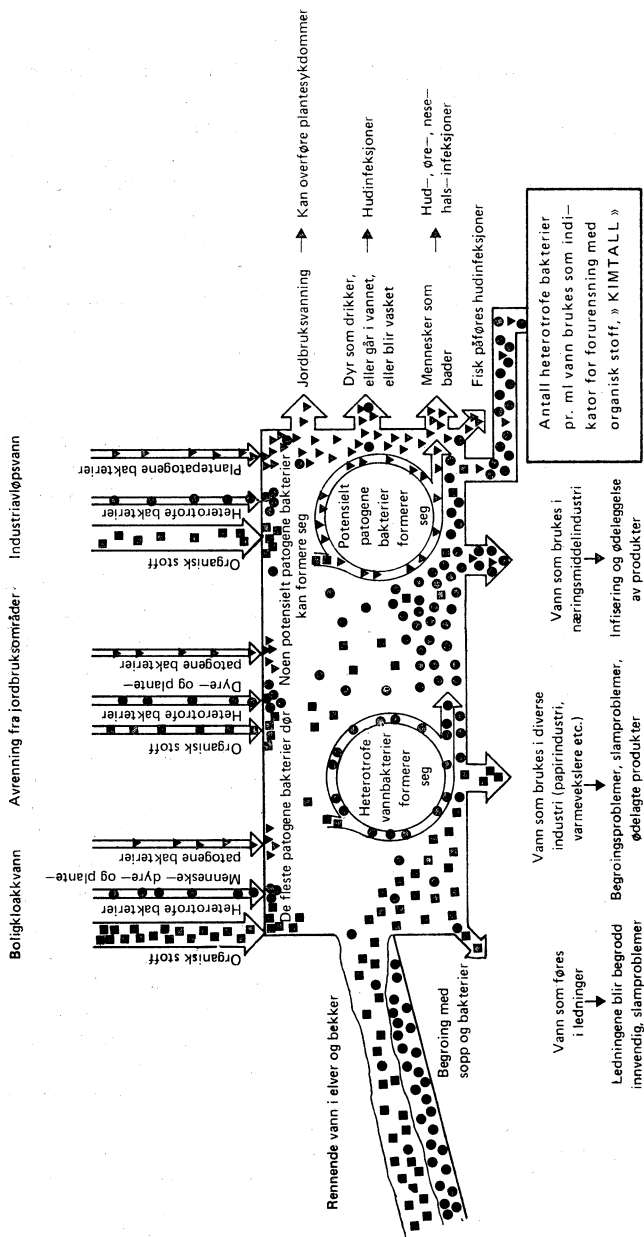
Dersom vannet tilføres lett nedbrytbart organisk stoff, vil vannets heterotrofe bakterier formere seg og raskt øke i antall, spesielt hvis vanntemperaturen ligger mellom 10 og 20°C. Det finnes også mange bakterier som vokser godt ved temperaturer ned til vannets frysepunkt. Alle bakterier viser økende veksthastighet ved økende temperatur, men alle har også

et temperaturområde der de har maksimal veksthastighet.

Dette området kaller vi bakterienes *temperatur-optimum*. Bakterier som har temperaturoptimum under 20°C kaller vi *psycrofile* bakterier. De som har temperaturoptimum mellom 20 og 45°C kaller vi *mesofile*, og de som har temperaturoptimum over 45°C kalles *termofile* bakterier. I naturen er det funnet termofile bakterier i varme kilder med temperatur på 55—65°C (11). I norske vassdrag kommer temperaturen sjelden over 20°C, og de bakterier som har størst aktivitet der må derfor vokse bra ved temperaturer mellom 5—20°C, enten de tilhører den *psycrofile* eller den *mesofile* gruppe. *Mesofile* bakterier med temperaturoptimum mellom 30—45°C forventes ikke å vokse raskt i slike vannmasser. Dette gjelder blant annet for bakterier i fekalier fra mennesker og varmblodige dyr. Slike bakterier er jo vant til å vokse ved de forskjellige dyrs kroppstemperatur, og de fleste vokser sakte ved 20°C. Etter at de er kommet ut i kjølige vannmasser formerer de seg ikke, eller bare sakte, selv om egnet organisk stoff er til stede.

Bakterier som er i stand til å vokse raskt ved temperaturer på 30°C og lavere kan også tilføres vannet utenfra. Vanlig husholdningskloakk inneholder slike bakterier, likeså avløpsvann fra næringsmiddelindustri. Ved kraftige regnskyll kan bakterier fra planter og jordbunnen bli vasket ut i vassdragene med avrenningsvannet. Når mennesker bader og husdyr går ut i vannet for å drikke, kan *mesofile* bakterier fra deres hud vaskes ut i vannet. Finner de da egnet organisk stoff i sitt nye miljø, kan noen av dem formere seg betydelig. I slike tilfeller vil tilførsel av lett nedbrytbart organisk stoff kunne føre til en oppblomstring av både de

FORURENSNING MED LETT NEDBRYTBART ORGANISK STOFF



Figur 2. Skjematisert fremstilling av problemer som kan oppstå ved bruk av vann som er forurenset med organisk stoff.

bakterier som er naturlig hjemmehørende i vannet og bakterier som er tilført utenfra. Noen av disse kan være patogene for mennesker, dyr eller planter, og bruk av slikt vann kan derfor medføre risiko for sykdom. Menneskepatogene bakterier som kan formere seg under slike forhold er f.eks. *Pseudomonas aeruginosa* og *Klebsiella*. *P.aeruginosa* er blitt vist å være en spesiell fare for svekkede pasienter ved sykehus, spesielt for pasienter med brannår (12). Ledningsvann med innhold av *P.aeruginosa* eller grønnsaker og frukt vasket eller vannet med slikt vann vil derfor være en smitekilde for disse pasienter.

Klebsiella isolert fra industriavløpsvann og fra dyr og mennesker med sykdom forårsaket av denne bakterietype har vist seg å kunne vokse godt i avløpsvann fra papirindustri, og de overlevde også lenge på poteter som ble lagret ved 5°C (13). Vannmasser forurenset med plantemateriale kan også være et potensielt reservoar for patogene *Klebsiella*-arter som kan komme til å infisere dyr, mennesker og akvatiske organismer, men denne smitekilde er foreløpig ikke vist å være av betydning i forhold til de vanligste smitekilder for denne bakterie.

Plantepatogene bakterier kan overføres til friske planter ved jordbruksvanning. Mennesker og dyr kan igjen smittes ved

bading, vassing og drikking. Øye-, øre- og hudinfeksjoner kan overføres på denne måten. Selv de bakterier som hører hjemme i vannet kan føre til problemer hvis de formerer seg kraftig. Oksygen-svinn er allerede nevnt, men de kan også være en infeksjonsfare for grønnsaker som vaskes med slikt vann før de lagres for vinteren. Også i næringsmiddelindustrien er slikt vann uønsket.

I rennende vann fører innhold av lett nedbrytbart organisk stoff til andre problemer. Selv meget små mengder kan her føre til store problemer. Grunnen er at det finnes mange mikroorganismer som har spesialisert seg på å vokse i rennende vann. De fester seg på alle flater som står i kontakt med vannet, og forsyner seg av det organiske stoff som stadig strømmer forbi. Mengde næring som passerer dem pr. døgn kan godt være stor selv om konsentrasjonen i vannet er liten. Bakterier fra genera *Caulobacter*, *Hyphomicrobium* og *Sphaerotilus*, samt soppene *Fusarium aquaeductuum*, *Leptomitus lacteus*, *Geotrichum candidum* er blant de organismer som vokser på denne måten. De fire sistnevnte vokser som tykke belegg på bunnen av forurensete bekker og elver. Slike mikroorganismer kan også føre til problemer med tilgroing av vannledninger (14). En oversikt over dette er vist i figur 2.

LITTERATUR

1. *Goulder, R.* Attached and Free Bacteria in an Estuary with Abundant Suspended Solids. *Journal of Applied Bacteriology*, 1977, 43, 399—405.
2. *Roy, A. B., and P. A. Trudinger.* Biochemistry of inorganic compounds of sulfur. Cambridge University Press, London 1970.
3. *Doelle, H. W.:* Bacterial metabolism. Academic Press, New York and London, 1969.
4. *Brock, Thomas D.* Biology of microorganisms. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1970.

5. *Kriss, A. E.*, Marine microbiology (Deep Sea). Oliver and Boyd, Edinburgh and London, English edition 1963.
6. Advances in microbiology of the sea. Edited by *M. R. Droop* and *E. J. Ferguson-Wood*. Academic Press, London and New York, 1968.
7. *Jannasch, H. W.*, *K. Eimhjellen*, *C. O. Wirsen*, *A. Farmanfarmaian*. Microbial degradation of organic matter in the deep sea. *Science* 171, 1971 p. 672—675.
8. *Ormerod, K.* Relationship between heterotrophic bacteria and phytoplankton in a eutrophic lake with water blooms dominated by *Oscillatoria agardhii*. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 20, 788—793, 1978.
9. *Lighthart, B.* A cluster analysis of some bacteria in the water column of Green Lake, Washington. *Can. J. Microbiol.* 21: 329—394.
10. *Trzilova, B.*, and *L. Miklosovicova*. Ökologische Beziehungen und einige physiologische Eigenschaften *Sporocytophaga cauliformis* (Myxococcaceae) in Wasser. *Biologia* (Bratislava) 30, 9, 685—691, 1975.
11. *Doemel, N. N.* and *Thomas D. Brock*. Structure, Growth, and Decomposition of Laminated Algal-Bacterial Mats in Alkaline Hot Springs. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 34, No 4, 1977, p 433—452.
12. *Pseudomonas aeruginosa*; ecological aspects and patient colonization. Edited by *Viola Mae Young*. Raven Press, New York, 1977.
13. *Knittel, M. D.*, *R. J. Seidler*, *Ch. Eby*, and *L. M. Cabe*. Colonization of the Botanical Environment by *Klebsiella* Isolates of Patogenic Origin. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 34 No. 5. 1977, p. 557—563.
14. *Ormerod, K.* Problemer med slam og dyr i drikkevann. Temarapport nr. 2. Norsk institutt for vannforskning, 1974.
15. *Fonden, R.* A yeast-extract peptone agar for the determination of heterotrophic bacteria in lakes. *Vatten* 2/68: 161—166, 1968.
16. *Väätänen, P.* *Short communication*. Effect of Composition of Substrate and Inoculation Technique on Plate Counts of Bacteria in the Northern Baltic Sea. *J. Appl. Bacteriology* 42, 437—443, 1977.
17. *Staattebræk, G.* Grunnleggende metoder ved undersøkelser av den mikrobielle flora i et forurenset marint miljø. Hovedoppgave i generell mikrobiologi til matematisk naturvitenskapelig embetseksamen, Universitetet i Bergen. Vårsemestret 1975.
18. *Lichtfield, C. D.*, *J. B. Rake*, *J. Zindulis*, *R. T. Watanabe* and *D. J. Stein*. Optimization Procedures for the Recovery of Heterotrophic Bacteria from Marine Sediments. *Microbial Ecology*, Vol. 1, 219—233 (1975).
19. *Meynell, G. G.* and *E. Meynell*. Theory and practice in experimental bacteriology. Cambridge, at the University Press, 1965.
20. *Prescott, S. C.*, *Ch.-E.A. Winslow*, and *M. H. McCrady*. Water bacteriology. With special reference to Sanitary water analysis. Chapman & Hall, Ltd., Sixth edition, 1950.
21. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 14th Ed. 1971. American Public Health Association, American Water Works Association. Water Pollution Control Federation.
22. *Ormerod, K.* Forsøk på å finne fram til alternative inkuberingsbetingelser for 3-døgn's kimtall. NIVA-rapport M4-1/68, Norsk institutt for vannforskning, 1968.
23. *NS 4571 Vannundersøkelse*. Metoder for bakteriologisk undersøkelse av drikkevann. Norges Standardiseringsforbund, Oslo. 1. utg. aug. 1976.
24. *Bonde, G. J.* Bedømmelse af drikkevand af «tvilvisom» karakter. *VAND*, 2. maj 1977, p.p. 33—39 (+ 58).
25. *Kvalitetskrav til vann*. Drikkevann — Vann for omsetning — Badevann. Første utgave jan. 1975. — Ny revidert utgave no. 1976. Utgitt av: Sosialdepartementet, Helsedirektoratet, ved Sanitær-kjemisk avdeling, Statens institutt for folkehelse (Oslo).