



RAPPORT LNR 4476-2002

Opprydding av forurensede sedimenter i Oslo havn

Anaerob nedbrytningstest med
sedimenter fra Bjørvika



Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5005 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-niva

9296 Tromsø
Telefon (47) 77 75 03 00
Telefax (47) 77 75 03 01

Tittel Opprydding av forurensede sedimenter i Oslo havn. Anaerob nedbrytningstest med sedimenter fra Bjørvika.	Løpenr. (for bestilling) 4476-2002	Dato 18.01.02
	Prosjektnr. Undernr. O-21058	Sider Pris 14
Forfatter(e) Morten Schaanning og Harry Efraimsen	Fagområde 37	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Oslo	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Norsk Avfallshåndtering (NOAH)	Oppdragsreferanse Kontrakt 07.05.01
--	--

Sammendrag

Anaerob nedbrytning av sedimenter fra Bjørvika ble undersøkt i henhold til en modifisert ISO 11734 test. Sedimenter ble inkubert ved 6-20°C i henholdsvis standard test medium med lav ionestyrke og sjøvann med høy ionestyrke. Alle inkubasjonene ble tilsatt podeslam opparbeidet fra ferskt Bjørvikasediment. Gassutvikling ble observert i organisk anriket podeslam, men ikke i noen av reaktorene i løpet av de fem månedene forsøket pågikk. Metanogene bakterier er sårbare og osmotisk stress kan ha virket inhiberende ved overføring fra podeslam til testmedier med lav ionestyrke. Den lave aktiviteten i sjøvannsreaktorene viste at det organiske karbonet i Bjørvikasedimentene var lite tilgjengelig for metanproduserende bakterier, men tilstedeværelse av sulfat og produksjon av hydrogensulfid kan ha virket inhiberende i disse reaktorene. Det kan derfor ikke utelukkes at metanogene bakterier over tid vil kunne aktiveres i deponiet etter at sulfatreservoaret er uttømt eller i mikronisjer i et heterogent mikrobielt miljø. På grunnlag av den observerte økningen av alkaliniteten i vannfasen ble det beregnet nedbrytningshastigheter på 34,8-38,6 nmolC/gTS dag i sjøvannsreaktorene. Dersom det antas at det organiske materialet under optimale betingelser vil kunne brytes ned med samme hastighet av metanogene bakterier ble det beregnet en potensiell gassproduksjonshastighet på 147 mlCH_{4(g)}/kgTS'år.

Fire norske emneord 1. Marine sedimenter 2. Anaerob nedbrytning 3. Gassdannelse 4. Slamdeponering	Fire engelske emneord 1. Marine sediments 2. Anaerobe degradation 3. Outgassing 4. Sludge disposal
---	--



Morten Schaanning
Prosjektleder

Kristoffer Næs
Forskningsleder
ISBN 82-577-4124-8



Jens Skei
Forskningsjef

Opprydding av forurensede sedimenter i Oslo havn.

Anaerob nedbrytningstest med sedimenter fra Bjørvika.

Forord

Denne rapporten er utarbeidet for Norsk Avfallshåndtering i henhold til arbeidsplan vedlagt kontrakt av 07.05.01 del 1 "Anaerob nedbrytning av organisk materiale i havnesedimenter". Prosjektet er utført i samarbeid med NGI som har hovedansvaret for del 2 "Elutriat-test med havnesediment under oksiske og anoksiske forhold". Prosjektet er koplet mot NFR prosjektnr: 134419/720 "Undersjøisk deponering av forurensede muddermasser i marine, anoksiske bassenger – effekter av tildekking" som er delfinansiert av Oslo Havnevesen. Harry Efraimsen og Wenche Knudsen hadde hovedansvaret for kjemiske analyser og den praktiske gjennomføringen av selve testen.

Oslo, 18. januar, 2002

Morten Schaanning

Innhold

1. Innledning	7
2. Materiale og metode	8
2.1 Testmateriale	8
2.2 Podeslam	8
2.3 Oppsett	8
2.4 Observasjoner	9
3. Resultater	10
3.1 Trykkmålinger	10
3.2 pH og alkalinitet	10
4. Diskusjon	12
5. Konklusjoner	13
6. Referenser	14

Sammen drag

Oslo Havnevesen planlegger mudring av forurensede sedimenter i Oslo havn. Sedimentene er i hovedsak anoksiske og inneholder vanligvis 1-10% organisk karbon. Sulfatreduserende bakterier dominerer vanligvis nedbrytningen i anoksiske marint sediment, men metanproduserende bakterier vil kunne gi gassansamlinger i et heterogent eller sulfat-utarmet deponi. For å undersøke potensialet for gassdannelse i et fremtidig deponi ble anaerob nedbrytning av sedimenter fra Bjørvika undersøkt i henhold til en modifisert ISO 11734 test. Sedimenter ble inkubert ved 6-20°C i henholdsvis standard test medium med lav ionestyrke og sjøvann med høy ionestyrke. Alle inkubasjonene ble tilsatt podeslam opparbeidet fra ferskt Bjørvikasediment. Gassutvikling ble observert i organisk anrikt podeslam, men ikke i noen av reaktorene i løpet av de fem månedene forsøket pågikk. Metanogene bakterier er sårbare og osmotisk stress kan ha virket inhiberende ved overføring fra podeslam til testmedier med lav ionestyrke. Den lave aktiviteten i sjøvannsreaktorene viste at det organiske karbonet i Bjørvikasedimentene var lite tilgjengelig for metanproduserende bakterier, men tilstedeværelse av sulfat og produksjon av hydrogensulfid kan ha virket inhiberende i disse reaktorene. Det kan derfor ikke utelukkes at metanogene bakterier over tid vil kunne aktiveres i deponiet etter at sulfatreservoaret er uttømt eller i mikronisjer i et heterogent mikrobielt miljø. På grunnlag av den observerte økningen av alkaliniteten i vannfasen ble det beregnet nedbrytningshastigheter på 34,8-38,6 nmolC/gTS·dag i sjøvannsreaktorene. Dersom det antas at det organiske materialet under optimale betingelser vil kunne brytes ned med samme hastighet av metanogene bakterier ble det beregnet en potensiell gassproduksjonshastighet på 147 mlCH_{4(g)}/kgTS·år. Anslaget er usikkert og vil mest sannsynlig representere en maksimumsverdi.

Summary

Title: Remediation of contaminated sediments in Oslo Harbour. Anaerobe test on degradation of sediments from a planned dredging area.

Year: 2002

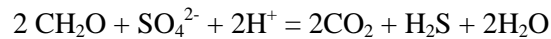
Author: Morten Schaanning og Harry Efraimsen

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-4124-8

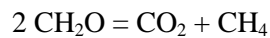
Remediation plans for the Oslo harbour area involves dredging and deposition of marine sediments in an anoxic basin in the Inner Oslofjord. The purpose of the present investigation was to assess possible gas accumulation from the activity of methane producing bacteria in the future deposit. Anaerobe degradation of marine sediments from the dredging area was therefore investigated in a test set-up modified from ISO 11734. Sediment aliquots were incubated at 6-20°C for an experimental period of five months. Activated sludge prepared at 13°C by mixing fresh sediments from the test area with easily degradable organic carbon, were added to the incubation reactors containing the test sediment and either a standard test medium with low ionic strength or seawater with high ionic strength. Anoxic conditions were documented throughout the test period by addition of oxygen indicator colour (resazurin). Significant gas production was observed in the activated sludge before incubation, but the head-space pressure showed no increase during the test period. Low methanogenic activity in standard test medium may have resulted from osmotic stress when transferring the bacteria from the activated sludge to the low ionic strength medium. The low activity in the seawater reactors indicated, however, that the organic carbon in the test sediment was not available to methane producers in this environment. The fact that sulfate ions were present and sulfate reducing bacteria were active in these reactors, may have been important with regard to inhibition of methane activity in these reactors. From observed increases of alkalinity, total biodegradation rates of 34,8-38,6 nmolC/g d.wght.day were calculated for the seawater reactors. Assuming that the organic material under more ideal conditions, e.g. after sulfate reservoir depletion and inhibition of sulfate reducer activity, might be subdue to fermentation at corresponding rates, a potential rate of gas production of 147 mlCH_{4(g)}/kg d.wght.y was calculated.

1. Innledning

Oslo Havnevesen planlegger mudring av forurensede sedimenter i Oslo havn. Disse sedimentene er i hovedsak anoksiske og inneholder vanligvis 1-10% organisk karbon (Konieczny, 1994). Karbonet er i utgangspunktet eldet og lite reaktivt, men langsom anaerobe nedbrytning vil likevel kunne medføre noe gassdannelse i deponerte masser. Anaerob nedbrytning av organisk materiale i marine sedimenter er dominert av to bakteriegrupper som driver henholdsvis sulfatreduksjon og metanogenese. Enkle biogeokjemiske modeller for nedbrytning av karbohydrater via sulfatreduksjon:



eller metanogenese:



er beskrevet i litteraturen av bl.a. Zehnder og Stumm, 1988. Iflg. slike modeller omdanner sulfatreduserende bakterier alt nedbrytbart organisk karbon til CO_2 , mens metanogene bakterier gir 50% metan (CH_4). Det er alminnelig antatt (Brock, 1979) at de fleste metanogene bakterier er avhengig av enkle organiske substrater som for eksempel metanol eller acetat, og at kjemolitoautotrofe bakterier kan produsere metan fra CO_2 og H_2 . CO_2 løses i porevannet og danner karbonsyre (H_2CO_3) som dissosierer til bikarbonat (HCO_3^-) og karbonat (CO_3^{2-}). Metan er lite løselig i vann og vil samles i gassblærer i sedimentet. Dette kan på sikt undergrave stabiliteten i massene.

For å undersøke potensialet for gassdannelse i et fremtidig deponi ble det besluttet å gjennomføre en anaerob nedbrytningstest på marine sedimenter fra Bjørvikva.

2. Materiale og metode

2.1 Testmateriale

Testmaterialet var en blandprøve av topplaget (0-30 cm) av sedimentet på ca 10 m vanddyb innsamlet i Bjørvika 06.12.00. Materialet antas å være representativt for en stor del av sedimentene som skal mudres, men det er viktig å være oppmerksom på at lokale variasjoner kan være betydelige også i forhold til herværende test-parametere (Konieczny, 1994, Hauge *et al.*, 1999). Materialet ble oppbevart i dypfryser ved -20°C frem til inkubering 09.05.01. Analyser av organisk karbon og nitrogen i tre replikate prøver av testmaterialet er vist i Tabell 1.

Tabell 1. Innhold av organisk karbon og nitrogen i replikate prøver av sedimentet brukt i testen.

	TOC mg/gTS	TN mg/gTS	C:N at. ratio
A	52,8	2,7	22,8
B	52,0	2,1	28,9
C	49,7	2,6	22,3

2.2 Podeslam

Podeslam skal forsyne inkubasjonene med aktive bakteriepopulasjoner. Podeslam ble opparbeidet fra ferskt sediment innsamlet i Bjørvika 05.04.01 og inkubert anaerobt i flasker tilsatt litt natriumbenzoat og metanol som karbonkilde. Inkubasjonstemperaturen ble holdt på 13°C og slammet ble jevnlig omrørt. Aktiviteten i podeslammet var betydelig, men avtok til å stoppe helt før inkubering. Dette viste at metanolen tilsatt podeslammet var fullstendig brutt ned før inkubering.

2.3 Oppsett

Testen er utført med utgangspunkt i ISO 11734 med følgende avvik:

- Istedenfor standardtemperatur på 30°C , ble testen gjennomført ved temperatur $6,4-8,1^{\circ}\text{C}$ fra 09.05. til 07.09. Deretter ble temperaturen øket til 20°C som ble opprettholdt frem til testen ble avbrutt 09.10.
- I tillegg til to replikater i standard test medium ble det satt opp to replikater der standard test medium ble erstattet med sjøvann fra 60 m dyp innsamlet fra vanninntaket på Marin Forskningsstasjon Solbergstrand. Dette vannet hadde en saltholdighet på 34 PSU.
- pH og alkalinitet ble målt ved start og slutt for beregning av produksjon av CO_2 .

Fullstendig oppsett er vist i Tabell 2. Standard test medium er en næringsløsning med fosfat, ammonium, kalsium, magnesium, jern og sporelementer. I tillegg tilsettes dinatriumsulfid og en oksygenindikator (resazurin) som gir synlig rødfarge ved tilstedeværelse av O_2 i reaktoren.

Tabell 2. Testoppsett for sju reaktorer (R1-R7).

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Tot. reaktor volum (ml)	1140	1140	1140	1140	541	541	541
Podeslam (ml)	10	10	10	10	5	5	5
Vått sed. fra Bjørvika (g)	215,7	210	208,4	208,5	102,7	0	0
Na-acetat (mgC/l)	0	0	0	0	20	20	0
Stand. test medium (ml)	0	0	900	900	450	450	450
Sjøvann (ml)	900	900	0	0	0	0	0

2.4 Observasjoner

I tillegg til observasjoner av rødfarge (oksygenindikator) ble trykket i lufta over væskefasen (*head-space*) avlest på manometere festet på hver enkelt reaktor. Etter at testen var avsluttet ble det besluttet å undersøke om innholdet av oppløst CO₂ hadde økt i løpet av inkubasjonstiden. pH og alkalinitet ble derfor målt i vannfasen i R1-R4 og sammenlignet med tilsvarende målinger utført i nylagde startløsinger med hhv sjøvann og standard testmedium og sammensetning forøvrig som vist i Tabell 2. Målingene ble utført ved NIVAs laboratorium etter standard metoder basert på titrering med svak syre og pH avlest med Radiometer glass-kombinasjonselektrode.

3. Resultater

3.1 Trykkmålinger

Testen er basert på gassproduksjon i gasstett flaske. Trykkøkningen i gassen over væskefasen registreres på manometer festet på toppen av reaktoren. Trykkavlesningene og oksygenindikasjoner er vist i Tabell 3.

Fravær av rødfarge i flaskene R1-R5 viste at miljøet i disse reaktorene var oksygenfritt gjennom hele testperioden. Rødfargen indikerte noe oksygen-forurensing i R6 og R7 ved starten av forsøket. I R7 kunne svak rosa farge observeres helt frem til 06.09. I R6 forsvant rødfargen før 2. avlesing 29.05.

Manometrene viste undertrykk i samtlige flasker i første del av forsøket. Dette skyldes trolig at temperaturen ved lukking av reaktorene lå noe over inkubasjonstemperaturen. Undertrykket i R1 var i en periode noe større enn i de øvrige flaskene, men ble utjevnet mellom 13.07. og 13.08., muligens som følge av utettheter. I de øvrige flaskene ble det observert en liten trykkøkning etter temperaturøkningen den 07.09. Økningen var imidlertid så liten og siden trykkøkningen var den samme i kontrollreaktoren (R7) er det mest sannsynlig at økningen skyldes at gass-utvidelse ved heving av temperaturen. Forsøket viste derfor ingen produksjon av gass i noen av flaskene.

Tabell 3. Trykk avlest i flaskene 9-153 dager etter inkubasjon. Fargeangivelsene viser eventuell tilstedeværelse av oksygen i flaskene. Kolonnehodene angir flaskenummer (R1-R7), testmedium (sjøvann eller standard test medium) og eventuelle tilsatser av sediment (sed.) og/eller acetat (C).

Dato	R1 Sjøvann sed.	R2 Sjøvann sed.	R3 Std. test sed.	R4 Std. test sed	R5 Std. test sed.+C	R6 Std. test C	R7 Std. test -
18.05	-0,89	-0,89	-0,8	-0,7	-0,66	rød	rød
29.05	-1,63	-0,83	-0,85	-0,6	-0,77	-0,74	rød
18.06	-1,86	-0,98	-1,04	-0,82	-0,9	-0,95	rosa
13.07	-1,67	-0,75	-0,77	-0,63	-0,6	-0,65	rosa
13.08	-0,01	-0,72	-0,83	-0,6	-0,59	-0,66	-0,42
06.09	0,00	-0,7	-0,73	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7 (rosa)
11.09	0,00	0,17	0,14	0,14	0,00	0,3	0,28
09.10	0,00	0,15	0,00	0,15	0,12	0,20	0,20

3.2 pH og alkalinitet

Alle observasjoner av pH og alkalinitet er vist i Tabell 4. Høy initiell alkalinitet i standard test medium (R3/R4) skyldes tilsetningen av svake baser, først og fremst HPO_4^{2-} , som bidrar til nøytralisering av syre under titreringen. Observasjonene viste at alkaliniteten hadde økt noe i løpet av forsøket. Dersom hele økningen skyldes anaerob produksjon av CO_2 viste beregninger en produksjon av 16,9-20,1 $\text{nmolCO}_2/\text{g TS}$ dag i standard testmedium og 34,8-38,6 $\text{nmolCO}_2/\text{g TS}$ dag i sjøvann.

Tabell 4. Observasjoner av pH og alkalinitet og beregnet produksjon av CO₂ i startinkubasjoner med sjøvann (R1/R2) og standard testmedium (R3/R4).

	pH	Alkalinitet (mM)	Beregnet [ΣCO ₂] (mM)	Δ[ΣCO ₂] (mM)	Produksjon CO ₂ (nmol/g TS dag)
Start R1/R2	7,81	3,860	3.713	-	-
Start R3/R4	7,83	5,088	4.894**	-	-
Slutt R1	7,95*	7,964	7.149	3,436	38.6
Slutt R2	7,99*	7,568	6.725	3,012	34.8
Slutt R3	8,11	6,898	6.344**	1,450	16.9
Slutt R4	8,12	7,208	6.619**	1,725	20.1

* Etter 5x fortytning med dest. vann med pH=5,50 og alkalinitet 0,031 (Wenche Knudsen, pers.med.).

** Høy alkalinitet i disse prøvene skyldes trolig bidrag fra svake syrer tilsatt standardløsningen (bl.a. ca 5 mM fosfat som Na₂HPO₄ og KH₂PO₄). Det ble ikke korrigert for dette ved beregning av [ΣCO₂] som dermed er feilaktig høy, men dersom feilen er konstant vil differensen mellom slutt- og start-konsentrasjon (Δ[ΣCO₂]) og beregnet produksjon av CO₂ være korrekt.

4. Diskusjon

Under tillaging av podeslammet ble Bjørvikasediment tilsatt lett nedbrytbart karbon og inkubert ved 13°C. Den betydelige gassproduksjonen observert i podeslammet viste at verken lav temperatur eller andre forhold hemmet den bakterielle aktiviteten i disse prøvene.

Manometermålingene viste imidlertid at det ikke ble dannet målbare mengder gass i noen av reaktorene i løpet av inkubasjonstiden. Det faktum at det ikke ble dannet noe gass i prøvene tilsatt lett nedbrytbart organisk karbon (R5 og R6) viste inhibering i reaktorene og det kan derfor ikke uten videre konkluderes at karbonet i sedimentene fra Bjørvika er lite reaktivt.

Marine bakterier er tilpasset sjøvannets høye saltinnhold og kan få osmotiske problemer i medier med lav ionestyrke. Standard test medium har ionestyrke tilpasset ferskvannsorganismer. En mulighet er derfor at bakteriene i podeslammet har blitt hemmet av osmotisk stress ved tilsetning til reaktorene med standard test medium (R3-R7).

Dersom det er sulfat tilstede i reaktoren vil aktiviteten i reaktoren lett domineres av sulfatreduserende bakterier som er mer energieffektive og som primært produserer CO₂. CO₂ danner karbonsyre (H₂CO₃) med høy løselighet i vannfasen og vil ikke gi vesentlig trykkøkning i reaktorene. Vått sediment fra Bjørvika vil ha 50-60% porevann med innhold av sulfat opp mot det som finnes i sjøvann. I reaktorene vil porevannet fra ca 200 g vått sediment/l ha gitt sulfatkonsentrasjoner oppimot 2,5 mmol sulfat. Som elektronakseptor for sulfatreduserende bakterier vil dette være tilstrekkelig til nedbrytning av 5 mmol eller 60 mg organisk karbon. Det må derfor ha vært nok sulfat tilstede til fullstendig nedbrytning av tilsatt Na-acetat (20 mgC/l) via sulfatreduksjon i reaktor R5 og en ikke ubetydelig aktivitet av sulfatreduserende bakterier i alle reaktorene unntatt R6 og R7.

Den observerte økningen av alkaliniteten viste produksjon av 1,4-3,4 mmol CO₂ i reaktorene R1-R4 (Tabell 4). Produksjonen var størst i sjøvannsreaktorene R1 og R2 som hadde størst overskudd av sulfat og en ionestyrke tilpasset forholdene i podeslammet. Produksjonen var mindre i R3 og R4 der osmotiske problemer så vel som lavere konsentrasjoner av sulfat kan ha hemmet aktiviteten av sulfatreduserende bakterier. Som vist i foregående avsnitt kan det ha vært sulfat nok til produksjon av inntil 5 mmol CO₂ i R3 og R4. Overskuddet synes ikke spesielt stort i forhold til den observerte produksjonen av 1,4-1,7 mmol i disse reaktorene. Dersom *in situ* sulfatreduksjon har redusert konsentrasjonen av sulfat i porevannet i forhold til sjøvann med tilsvarende saltholdighet, vil overskuddet av sulfat i reaktorene kunne ha vært enda mindre enn her beregnet.

5. Konklusjoner

Gassutvikling ble observert, men ikke kvantifisert under tillaging av podeslammet ved tilsetting av Na-benzoat og metanol til ferskt sediment fra Bjørvika. Dette indikerte at metanogene bakterier er tilstede i sedimentet, men at de er lite aktive uten tilgang på lett nedbrytbart organisk karbon.

Organisk anrikete kontroller (R5 og R6) ga ingen gassutvikling i forsøket. Det antas at dette skyldes osmotisk stress ved transplantasjon av metanogene podeslam-bakterier tilpasset høy ionestyrke (PSU \approx 30), til standard test medium med lav ionestyrke (PSU \approx 1).

Det ble ikke observert gassutvikling i noen av reaktorene verken med standard test medium (R3 og R4) eller sjøvann (R1 og R2). Det er lite sannsynlig at de metanogene bakteriene var hemmet av osmotisk stress i sjøvannsreaktorene. Fraværet av gass i disse reaktorene kan skyldes at karbonet i Bjørvikasedimentet var lite egnet substrat i forhold til metanproduksjon. Konkurransen med sulfatreduserende bakterier, eventuelt inhiberende effekt av sulfat eller H₂S, kan også ha bidratt til å hindre gassdannelse i disse reaktorene.

Gjennomsnittlig produksjon av CO₂ i sjøvannsreaktorene var 36,7 nmol/g TS dag. Det antas at dette utelukkende skyldes nedbrytning via sulfatreduserende bakterier. Dersom metanogene bakterier overtar nedbrytningen etter at sulfatreservoaret i et tenkt deponi er uttømt vil det være rimelig at nedbrytningshastigheten er langsommere enn i reaktorene, både fordi det organiske materialet blir gradvis mindre nedbrytbart og fordi de metanogene bakteriene er mindre energieffektive enn de sulfatreduserende. I tillegg kommer at metanogenesen vil omdanne bare 50% av det organiske karbonet til metan (Zehnder og Stumm, 1988).

Dersom det antas at det organiske materialet i Bjørvikasedimentet vil brytes ned like raskt i deponiet som i sjøvannsreaktorene og at nedbrytningshastigheten er like høy for de metanogene som for de sulfatreduserende vil den observerte nedbrytningshastigheten på 36,7 nmolC/g TS dag tilsvare en metanproduksjon på 147 ml gass/kg TS år ved standard trykk og temperatur (1 atm., 25°C).

6. Referenser

- Brock, T.D., 1979. Biology of microorganisms. Prentice/Hall International editions. 3rd ed. 1979. 802pp.
- Hauge, A., E. Eek og J. Skei, 1999. Forurenset sediment og vannkvalitet. Forslag til løsninger. NGI, Teknisk notat 99016, 30.06.99, 19s + vedlegg.
- Konieczny, R., 1994. Miljøgiftundersøkelser i Indre Oslofjord. Delrapport 4. Miljøgifter i sedimenter. NIVA rapport LNR 3094-94. 134 s.
- Zehnder, A.J.B. and W. Stumm, 1988. Geochemistry and biogeochemistry of anaerobic habitats. In A.J.B.Zehnder (Ed.), Biology of Anaerobic Microorganisms, John Wiley and Sons, Inc. pp.1-35.