

Livet i underverdenen



Foto: IODP-USIO.

Størstedelen af alle mikroorganismer på vores planet findes dybt nede i undergrunden. De lever under betingelser, som bryder med vores hidtidige forestillinger om grænserne for liv, og vi må udvikle nye metoder for overhovedet at kunne studere deres livsprocesser.

Af Bo Barker Jørgensen og
Camilla Nissen Toftdal

■ Uanset hvor langt vi borer ned i havbunden, finder vi liv i form af mikroorganismer. Det er gang på gang konklusionen, når mikrobiologer sejler ud på store forskningsboreskibe for at undersøge havets bund. Men faktisk skal vi kun få årtier tilbage, før forskerne overhovedet begyndte at lede efter levende bakterier i prøver fra dybe borer i havbunden. Siden er de mange mikroskopiske celler gradvist vokset til en

global database for bakterier i undergrunden.

Da amerikanske forskere for første gang forsøgte at beregne det samlede antal mikroorganismer på Jorden – dels i boremateriale og dels i alle de vigtigste økosystemer på kontinenterne og i havet – nåede de et chokerende resultat: Over 90 procent af alle mikroorganismer lever dybt nede i undergrunden, og de udgør mellem en tiendedel og en tredjedel af al levende bio-

masse på Jorden. På baggrund af denne overraskende erkendelse er et nyt og spændende forskningsområde opstået – udforskningen af “den dybe biosfære”. Hvorfor er der så mange mikroorganismer i undergrunden? Hvad er det for organismer, og hvordan er det muligt for dem at leve dernede?

De fleste kender bedst havbunden som blødt mudder, vores fødder synker svagt ned i om sommeren, men under

overfladen folder havbunden sig ud som en verden uden lys eller ilt, en verden med ekstrem næringsfattigdom og med et enormt tryk. Alligevel findes her et standhaftigt liv, der er næsten udforsket og særdeles svært tilgængeligt.

En verden uden lys og ilt
Havbunden dannes som på et transportbånd ved at magma trænger op langs undersøiske bjergkæder midt ude i ocea-

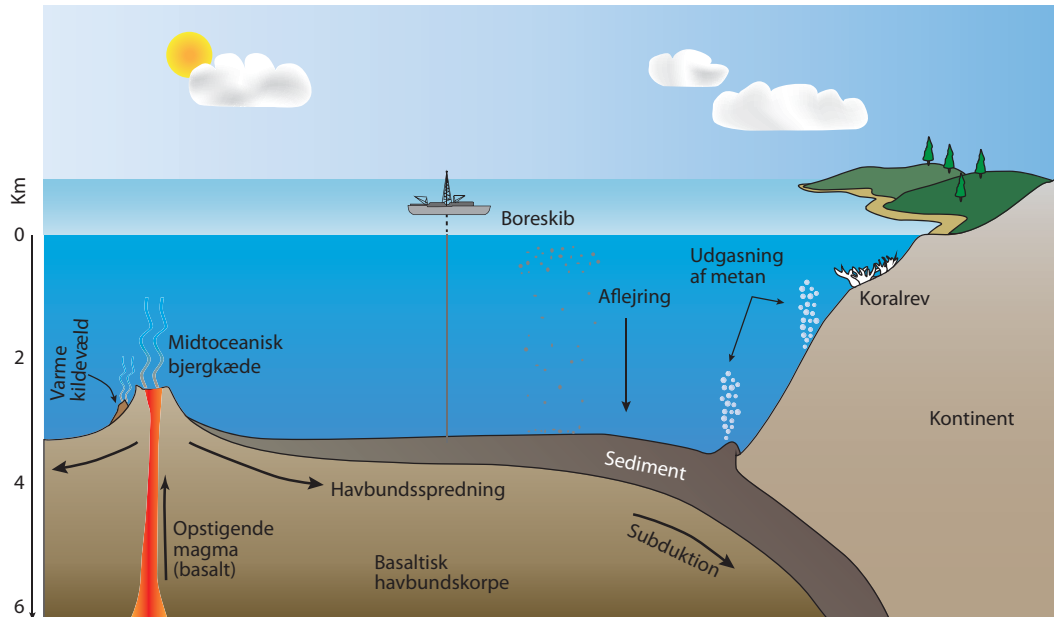
← JOIDES Resolution, er forskningsboreskibet for IODP (Integrated Ocean Drilling Program). Det er 143 meter langt og kan bore 2000 meter ned i havbunden på havdybder ned til 7000 meter.

nerne og presser en basaltisk havbundsskorpe ud til siderne. Processen er geologisk, og den er med til at drive den globale pladetektonik, der får kontinenter til langsomt at bevæge sig på Jordens overflade med få centimeter om året. Over millioner af år bevæger havbundsskorpen sig ud mod kontinentalrandene, og undervejs sker der en aflejring af mineraler og rester af dyr og planter. Til sidst bliver det aflejrede materiale til et – sommetider kilometer tykt – fast mudderslag. Det er selve havbunden.

Tæt på overfladen er havbunden altså ung af geologisk alder, men dybt nede er den gammel og aflejret for millioner af år siden. Helt ned til halvanden kilometers dybde har det hidtil været muligt for forskerne at påvise mikroorganismer. Der er fundet mikrobielt liv nede i havbundslag, der blev aflejret for over 100 millioner år siden.

Ekstrem energibegrænsning

Energi er en forudsætning for alt liv. Vi lever i en verden, hvor sollyset leverer energien, som planterne udnytter til fotosyntese og dermed danner organisk stof, der igen er grundlaget for dyr og mikroorganismer i fødekæder og stofkredsløb. Men hvordan leveres der energi til de enorme mængder af mikroorganismer, som bebor den dybe og mørke undergrund? Den største energikilde er også her det organiske materiale, som for millioner af år siden faldt ned på havbunden, og som langsomt blev begravet under hundreder af meter aflejring. Efter så mange år er stofomsætningen ufattelig langsom, men den går aldrig helt i stå. Der bliver ved med at være lidt

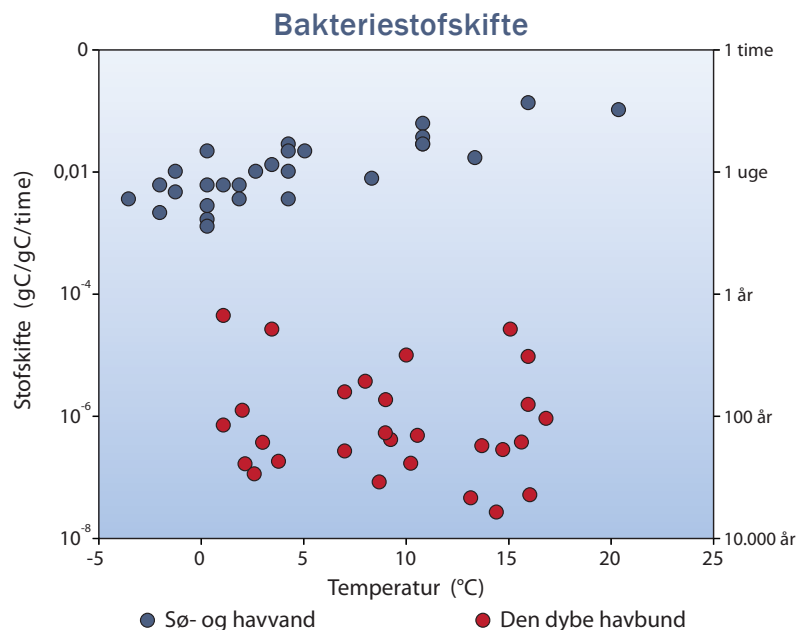


Havets dybe biosfære

Midt ude i oceanerne findes verdens længste bjergkæder flere kilometer under havets overflade. Havbundens skorpe af basalt bliver langsomt skubbet ud til siderne og sprækker, fordi frisk magma presser sig op. Processen bevirker, at en ny skorpe bliver formet, og samtidig drysser små døde alger og dyr og mineraler ned og danner efterhånden tykke aflejringer oven på basalten.

Nede i de ældgamle aflejringer, og endda nede i den basaltiske stenskorpe, eksisterer et mangfoldigt liv af mikroskopiske encellede organismer. Det drejer sig om bakterier og arkæer, og det er muligt, at her også findes flercellede organismer. Havbunden og dens dybeste lag, som vi kalder havets dybe biosfære, er enorm i udstrækning, og livet dernede udgør mellem en tredjedel og en tiendedel af al biomasse på jorden.

Havbunden udgør jordens største depot for begravet organisk materiale, og den spiller en afgørende rolle for de kemiske balancer på jorden, f.eks. jordens kulstofkredsløb. Den er også et værdifuldt klimaarkiv for geologerne, som i dybe borekerner kan aflæse oceanets tidlige historie helt tilbage fra den tid, da dinosaurer beherskede landjorden.



Figuren viser eksempler på størrelsen af stofskiftet for bakterier. Blå farve: Bakterier i søer og i havvand. Rød farve: Bakterier dybt nede i havbunden. Venstre skala angiver bakteriestofskiftet ved forskellige temperaturer beregnet som gram kulstof omsat per gram celle-kulstof per time. Højre skala angiver omsætnings-tiden for bakteriernes biomasse. Det svarer omtrent til bakteriernes generationstid, hvis de gror.

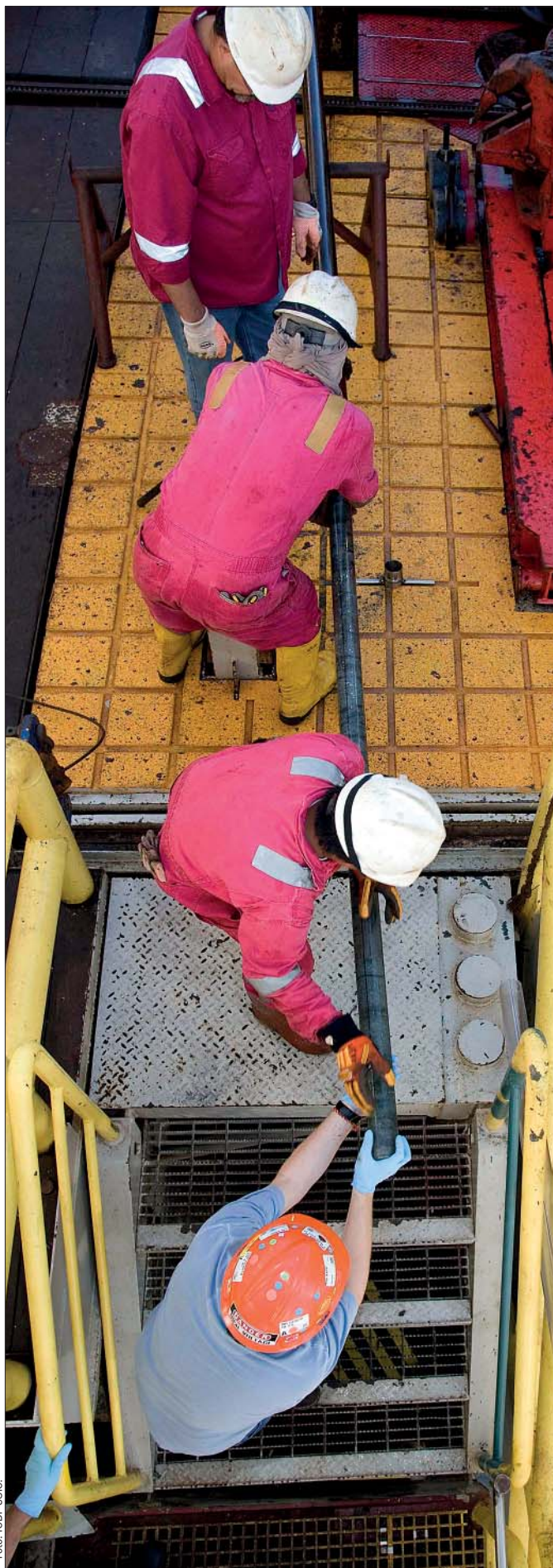


Foto: IODP-USIO.

energi at udnytte ved yderligere at nedbryde det begravede organiske stof, selv efter at en del er omdannet til råolie.

Størstedelen af alle mikroorganismer på Jorden lever altså under ekstrem energibegrænsning. Igennem omfattende analyser har det været muligt at påvise hvilke processer, der leverer energien, og hvor meget energi der er til rådighed. Dermed kan vi beregne det gennemsnitlige stofskifte pr. celle og pr. tidsenhed. Da cellerne skal omsætte en vis mindste mængde af stof, før de har opbygget tilstrækkelig biomasse til at dele sig, kan vi også beregne deres gennemsnitlige generationstid: hundreder til tusinder af år. Den dybe biosfære bebos altså af organismer, som efter vores målestok stort set aldrig formerer sig. Det forbliver en af de største gåder, at så stor en del af alt liv på Jorden trives på et stofskifteniveau, som ligger en million gange under de bakteriekulturer, som forskere normalt studerer i laboratoriet. Stofskiftet ligger endda tusind gange under det, som vi normalt har betragtet som det mindste "hvilestofskifte" for bakterier, der ikke gror.

Brint som energikilde

Beregningerne af mikroorganismernes gennemsnitlige generationstid provokerer naturligvis forskerne til at søge efter uopdagede energikilder, som kan forklare organismernes talrige tilstedeværelse. Der er faktisk også fundet alternativ energi, især i form af molekylær brint, som jo fra moderne bilteknologi er kendt som en fremragende energikilde. Brint dannes under kemiske reaktioner mellem havvand og bjergarter i den unge havbundsskorpe ved processer, man kalder serpentinisering. Nok så interessant er det, at brint også dannes ved den højenergetiske stråling fra de naturlige radioaktive stoffer. Stofferne

forekommer overalt i havbunden, men den energirige brint bliver især dannet fra kalium-40, thorium-232 og uran-238. Højenergetisk stråling spalter vandmolekyler, og et af produkterne fra denne radiolyse er molekylær brint, som bakterierne kan leve af. Det er dog stadig ikke bevist, at de derved vinder mere energi, end de skal forbruge på at reparere skader på DNA og andre følsomme molekyler på grund af den radioaktive stråling.

Geokemiske og radioaktive processer i undergrunden kan på den måde skabe forudsætninger for et liv, som er helt uafhængigt af sollys og fotosyntese. Et sådant liv er fundamentalt forskelligt fra det, vi bedst kender, men teoretisk set kan det også forekomme under overfladen på andre planeter som f.eks. Mars, hvor der dybt nede i undergrunden er de samme temperaturer og radioaktive isotoper som i den dybe havbund.

Kerner hentet op i lyset

Det måske mest uudforskede område af vores egen planet, nemlig havbunden, driver både mikrobiologer, kemikere og geologer ud på de store oceaner i et omfattende internationalt samarbejde, som Danmark deltagere i blandt andet gennem medlemskab af IODP (Integrated Ocean Drilling Program). For havbunden rummer et klimahistorisk arkiv over oceanernes udvikling over millioner af år, og dens beboere er mikroorganismer, hvis identitet og funktion stadig er ukendt.

Fra et boreskib kan forskere i dag bore dybt ned i havbunden, ligesom man gør i olieindustrien, og med avanceret udstyr hente intakte kerner op, som kan studeres i laboratoriet. Af allervigtigste betydning er det, at man også kan tage prøver, der ikke er forurenede af bakterier fra overfladeverdenen. I kernematerialet studerer mikrobiologer de mikroskopiske celler med

"Core on deck". Vi er på det store boreskib, JOIDES Resolution, og teknikerne har netop fået en 10 meter lang kerne af havbunden op på dækket. Snart skal kernen skæres op og bæres ind i laboratoriet.

Forskning i livet i den dybe biosfære er "mikrobiologi under de værste mulige betingelser". For når stofskiftehastigheden per celle er million gange lavere end i en laboratoriekultur, er det ikke muligt at studere mikroorganismernes livsbetingelser ved at dyrke dem i laboratoriet. Derfor udvikler vi nye metoder, som er uafhængige af dyrkning. Billedet viser isolering af enkelte bakterieceller fra havbunden ved hjælp af laser mikrodisektions-mikroskopi (LMD), mens mikroskopfotoet viser lysende punktformede bakterier fra havbunden, hvis DNA er farvet med et fluorescerende färvestof.



Foto: Bo Barker Jørgensen

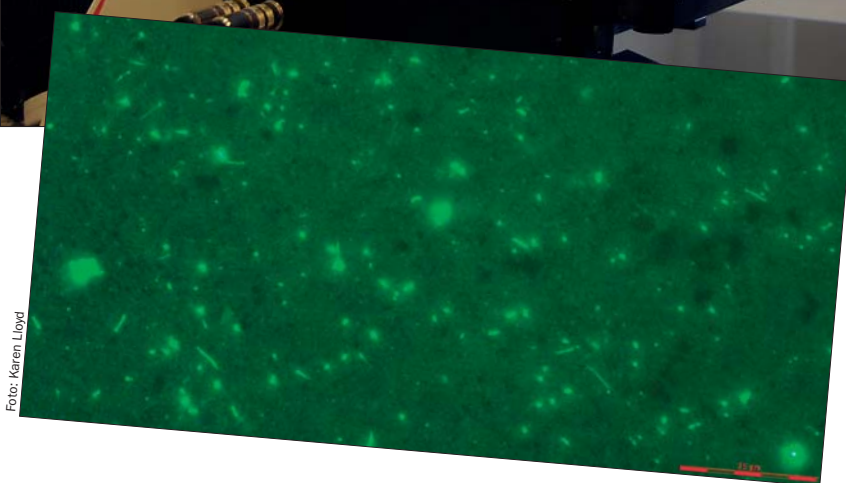


Foto: Karen Lloyd

moderne teknikker baseret på mikroskopi eller på organismernes DNA og andre specifikke cellebestanddele. Samtidig analyserer geokemikere de stofskifteprocesser, som er organismernes livstegn.

Ukendt liv

Det er velkendt, at mikroorganismer har evnen til at sprede sig overalt, hvor de har vækstbetingelser. Men nede i den dybe havbund er afstandene for store og materialet for kompakt til, at de kan sprede sig effektivt. Cellerne i den dybe biosfære kan heller ikke bevæge sig, for de har slet ikke energi til at få en flagel til at dreje rundt. De mikroorganismer, vi finder her, er derfor formodentlig kun efterkommere af de mikroorganismer, som blev begravet for millioner af år siden, og som har udviklet nye samfund isoleret fra Jordens overflade.

Vi forsøger nu at kortlægge

mikroorganismernes genetiske mangfoldighed ved hjælp af DNA-prøver fra borekernerne og ved at sammenligne dem med samfund fra havbundens overflade. Det er et vanskeligt arbejde. Et af de store problemer er, at næsten alle mikroorganismerne er genetisk helt forskellige fra alle andre organismer, der hidtil har været studeret i laboratorier verden over. Vi har altså umiddelbart ingen mulighed for at vide, hvordan de lever, og hvilke processer de udfører i undergrunden.

Moderne DNA-teknologi gør det imidlertid muligt at bestemme de genetiske koder i millioner af gener og dermed at indplacere mikroorganismerne i livets store genetiske stamtræ. Det viser sig, at de fleste mikroskopiske celler ikke er bakterier, men hører til et andet domæne af liv, som kaldes arkæer. Arkæerne har mest været kendt for at danne naturgas (metan) eller

for at kunne leve ved meget høj temperatur i vulkanske kilder. Men dybt nede under vores fødder eller nede i havbunden udgør de en stor del af alle de levende organismer.

Nye forskningsmetoder

Hvordan studerer man mikroskopisk liv, når organismerne ikke gror og deler sig og i det hele taget har så ringe stofskifteaktivitet, at det er næsten umåleligt? Forskningen er her inde i en hastig udvikling, som allerede nu åbner nye muligheder. Ved hjælp af isotopmærkede sporstoffer, mærket med f.eks. kulstof-13 eller kulstof-14, kan vi "fodre" bakterierne i havbundsprøver med de samme organiske forbindelser, som de normalt optager i undergrunden. Derefter kan vi bestemme isotoptagelsen i specifikke organiske komponenter af cellerne, så som i fedtstofferne fra deres cellemembraner eller i

deres DNA, og vi kan således påvise, hvilke organismer der er aktive, og hvad de lever af. De nyeste udviklinger inden for avanceret analyseteknik gør det tilmed muligt at kortlægge isotoperne i de enkelte celler, så vi kan se, hvor meget de enkelte bakterier har "spist". Hertil anvendes et højopløsende sekundær-ion massespektrometer, en såkaldt nanoSIMS, som Danmark desværre endnu ikke råder over, men som danske forskere kan få adgang til i udlandet.

Det har altid været en drøm for mikrobiologer at kunne studere de enkelte celler af bakterier eller arkæer, ligesom man kan studere et enkelt dyr eller en enkelt plante. Med nanoSIMS'en er forskningen rykket et stort skridt nærmere dette mål. En anden milepæl i samme retning, som for nylig er nået af forskere ved Center for Geomikrobiologi, er at hente enkelte



En ørken i oceanerne

Før den danske Galathea ekspedition i midten af forrige århundrede var det ukendt, om der fandtes liv på de største dybder i oceanet. Ekspeditionen bragte imidlertid levende dyr op fra bunden af selv de dybeste oceangrave, og mikrobiologer fandt bakterier ned til 5 meters dybde i havbunden – men ikke dybere. Formodningen var, at der var tale om ekstreme livsbetingelser, hvor selv bakterier kun kunne gro meget langsomt. Teorien blev understøttet af historien om to sandwiches, der overlevede i 10 måneder i undervandsbåden ALVIN, da den i 1968 sank på flere kilometers dybde. Siden har vi lært, at dybhavet og den dybe havbund er verdens største habitat for levende mikroorganismer, og at mange af de processer, som tidligere blev henregnet til geologien, i virkeligheden skyldes biologi.

På billedet ses undervandsbåden ALVIN på ekspedition i den Californiske Golf, som rummer varme kildevæld i 2000 meters dybde. Disse kilder udgør et vindue til den dybe biosfære, hvor bakterier lever i den dybe havbund ved over 100°C.

celler ud af materiale fra den dybe biosfære og at opformere deres DNA, så hele deres genetiske kode kan bestemmes. Dermed kan vi analysere, hvilket omfattende sæt af gener den enkelte celle har, og dermed hvilke biokemiske stofskeftveje, den kan udføre. Med disse nye muligheder kan mikrobiologer

i fremtiden identificere og studere enkelte celler, uden at cellerne nødvendigvis skal kunne dyrkes i laboratoriet.

Global betydning

Opdagelsen af den dybe biosfære har været som at opdage et nyt kontinent, en verden fuld af ukendte mikroorganis-

mer med ukendte egenskaber. Det er endnu for tidligt at sige, hvilke praktiske konsekvenser opdagelserne vil have. Vi ved, at mikroorganismene i undergrunden er afgørende for hvor stor en del af det begravede organiske materiale, der bliver nedbrudt og dermed igen indgår i de globale stofkredsløb. Den dybe biosfære er således afgørende for, hvor meget organisk stof, der indlejres i sedimentbjergarter over geologiske perioder, hvilket igen spiller en vigtig rolle for atmosfærens iltindhold og for Jordens klima på langt sigt. Den dybe biosfære er også aktiv i omdannelsen af råolie, i dannelsen af naturgas og i mange andre vigtige processer. Og vi forventer, at vores forskning i fremtiden vil afsløre mange andre egenskaber hos undergrundens bakterier og arkæer, som vi mikrobiologer end ikke har kunnet forestille os. ■

Geomikrobiologi

Geomikrobiologi drejer sig om interaktioner mellem mikroorganismer og mineraler i den faste jord. Aarhus Universitet har et Center for Geomikrobiologi – finansieret af Danmarks Grundforskningsfond og det tyske Max Planck Selskab – hvor forskningen er koncentreret om mikroorganismene i havbundens dybeste sedimentlag.

Vi arbejder både i Aarhus Bugt og ude på de store oceaner. Arbejdet med at hente kerner op fra store oceaners dybeste lag kan kun ske fra et forskningsboreskib, og det foregår blandt andet i regi af det internationale forskningsboreprogram *Integrated Ocean Drilling Program*. Senest har forskere fra Center for Geomikrobiologi undersøgt den dybe biosfæres mikrobiologi fra forskningsskibet JOIDES Resolution i så forskellige havområder som Beringhavet, det nordlige og sydlige centrale Stillehavet og det centrale Atlanterhav.

Om forfatterne



Bo Barker Jørgensen er professor i geomikrobiologi og leder af Center for Geomikrobiologi, Aarhus Universitet. bo.barker@biology.au.dk



Camilla Nissen Toftedal er cand.mag. og centeradministrator ved Center for Geomikrobiologi, Aarhus Universitet. toftedal@biology.au.dk

Videre læsning:

Bo Barker Jørgensen & Antje Boetius (2007) "Feast and Famine – microbial life in the deep-sea bed", *Nature Reviews Microbiology*, 5, 770-781.

Amanda Leigh Mascarelli (2009) "Geomicrobiology: Low life", *News Feature i Nature*, 459: 770-773.

Peter Bondo Christensen et al. (2002) *Stofomsætning i havbunden, Temarapport fra DMU*, 42/2002.

Center for Geomikrobiologi (CFG): www.geomicrobiology.au.dk