



KABELBAKTERIER

– et unikt fund i Aarhus Havn

Lars Peter Nielsen (th) og Niels Risgaard-Petersen i færd med at tage sedimentprøver i Aarhus Havn. Sedimentet er fyldt med kabelbakterier: Fotos: Lars Kruse.

Strømførende bakterier var indtil for få år siden et nærmest utænkeligt fænomen. Nu finder forskere dem overalt i verden, efter danske forskere først fandt dem i Aarhus Havn.

»Det er faktisk enormt pinligt, at vi ikke fandt dem før. Vi har rodet i havbunden og i sedimentlagene i mange år, og man spørger sig selv, hvordan det har været muligt for os at overse dem.«

Sådan fortæller professor og centerleder Lars Peter Nielsen fra Center for Elektronmikrobiologi ved Aarhus Universitet. Han snakker om de kabelbakterier, som han sammen med sine kolleger fra Aarhus Universitet fandt på bunden af Aarhus Havn for omkring 10 år siden, og som siden da har ændret mikrobiologers syn på, hvad der er biologisk muligt.

Kabelbakterierne er nemlig i stand til at lede strøm over store afstande, ganske som en ledning du kan købe nede i byggemarkedet. Når de gør det, ændrer de fuldstændigt den kemiske sammensætning i havbunden og dermed også livsbetingelserne for alle de dyr, som lever der.

Man kan måske stille sig selv spørgsmålet: Hvor stort et aftryk nogle enkelte bakterier i havbunden kan sætte på havets økologi, men forskningen, som i disse år udspringer fra Aarhus Universitet, viser, at kabelbakterierne ikke skal ses som en kuriositet. De dominerer havbun-

den, hvor de kan stå for op til 80 procent af havbundens iltforbrug. Havbunden er deres kongedømme.

»Når man ser på, hvad vi ved i dag, er det slet ikke til at forstå, at vi har kunnet overse dem i faktisk mere end hundrede år,« siger Lars Peter Nielsen.

Forskerne troede det var en fejl

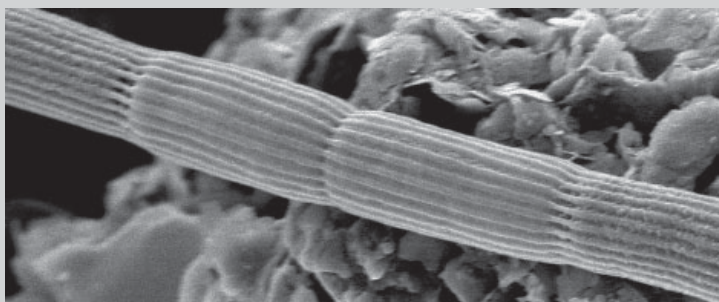
Vi starter fortællingen om kabelbakterierne, som var det et hvilket som helst andet eventyr, med "Der var engang". Der var nemlig engang, hvor ingen af verdens mange hundrede forskere, som dagligt undersøgte havbunden og det øverste

Forfatteren
Kristian Sjøgren

Forskeren
Lars Peter Nielsen
er professor ved
Institut for Biologi,
Aarhus Universitet
og leder af Center for
Elektronmikrobiologi.
lpn@bios.au.dk

Nærbillede af kabelbakterie set med elektronmikroskop. Man ser fire celler, og man ser tydeligt de langsgående ribber, hvor kabelbakteriernes "ledninger" ligger indeni.

Foto: Yuri Gorby and Anne Hynes (Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY).



Fakta om kabelbakterier

- Forskere har indtil videre identificeret to slægter af kabelbakterier, *Electrothrix* og *Electronema*, og under dem findes der henholdsvis fire salt- og brakvandsarter og to ferskvandsarter. Alle kabelbakterier falder ind under familien *Desulfobulbaceae*.
- Kabelbakteriernes ledninger sidder som lange ribber på langs af bakterierne. Forskningen fra Aarhus Universitet viser, at ledningerne sidder mellem bakteriens indre og ydre membraner.
- Kabelbakterierne er i modsætning til de fleste bakterier multicellulære. Det vil sige, at bakterierne består af flere celler. Man skal ikke betragte de enkelte celler som selvstændige bakterier, men derimod bakterien som summen af de mange celler, der godt kan have hver deres funktion. I kabelbakterien har nogle celler eksempelvis den funktion, at de skal afgive elektroner til ilt, mens andre optager elektroner fra sulfid.
- Én teskefuld sediment fra havbunden kan indeholde over én kilometer kabelbakterier.
- Endnu ved ingen, hvad de elektriske ledninger, som løber langs med kabelbakterierne, er lavet af.
- Én kabelbakterie kan blive mere end fem centimeter lang.



Mikroskopibillede af et sediment med aktive kabelbakterier. En del af sedimentet er udskiftet med lidt blød agar, så det er muligt at kigge igennem prøven. Billedet er orienteret ligesom i sedimentet på havbunden – dvs. for oven i billedet findes den ilttrige zone, og et stykke under billedudsnittet er der sulfid. Udsnittet fylder cirka ½ cm i højden.

Foto: Steffen Larsen og Lars Riis Damgaard

sedimentlag, havde forestillet sig, at i alle deres havbundsprøver fandtes en decideret verdenssensation. Året var 2007, og på Danmarks Miljøundersøgelser var Lars Peter Nielsen sammen med sine kollegaer i færd med at foretage nogle klassiske studier af havbundens kemi i Aarhus Havn.

I deres forsøg undersøgte forskerne iltforbruget i det øverste sedimentlag. Biokemisk er det øverste sedimentlag interessant, fordi der i sedimentet foregår kemiske og biokemiske processer, hvor sulfid (det, som får havbunden til at lugte af rådne æg) bliver brændt af med ilt som energikilde. Alt det sker i et tyndt lag, hvor bakterier står for en stor del af den kemiske reaktion og trækker energi ud af omdannelsen af sulfid til sulfat. Når forskerne måler på de forskel-

lige kemiske komponenter ned gennem en søjle af sediment, kan de da også se, at ilt ikke kommer længere ned i sedimentet end til reaktionslaget, og sulfidet ikke kommer længere op.

Denne del af de aarhusianske forskeres arbejde gik, som det skulle, men efter nogle uger i laboratoriet så forskerne noget, de ikke kunne forklare. Når de målte på deres sedimentsøjler, var iltlaget og sulfidlaget adskilt af en zone på flere centimeter, hvor der hverken var sulfid eller ilt.

»Vi kunne se, at begge stoffer blev brugt, selvom de ikke var i nærheden af hinanden, og vi kunne ikke forklare det med nogle kemiske eller naturlige fænomener. Så troede vi selvfølgelig, at vi havde lavet fejl i vores forsøgsopsætning og gjorde

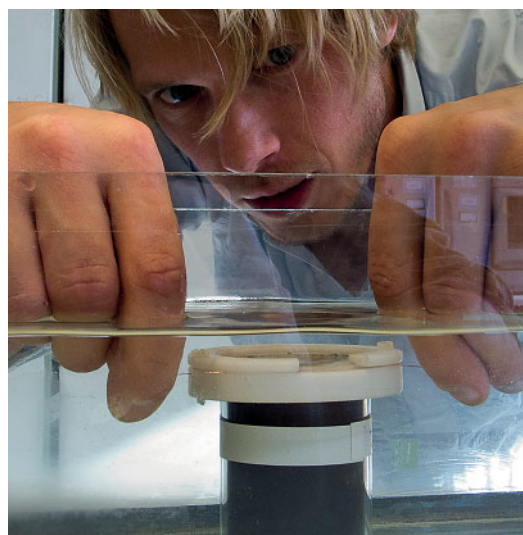
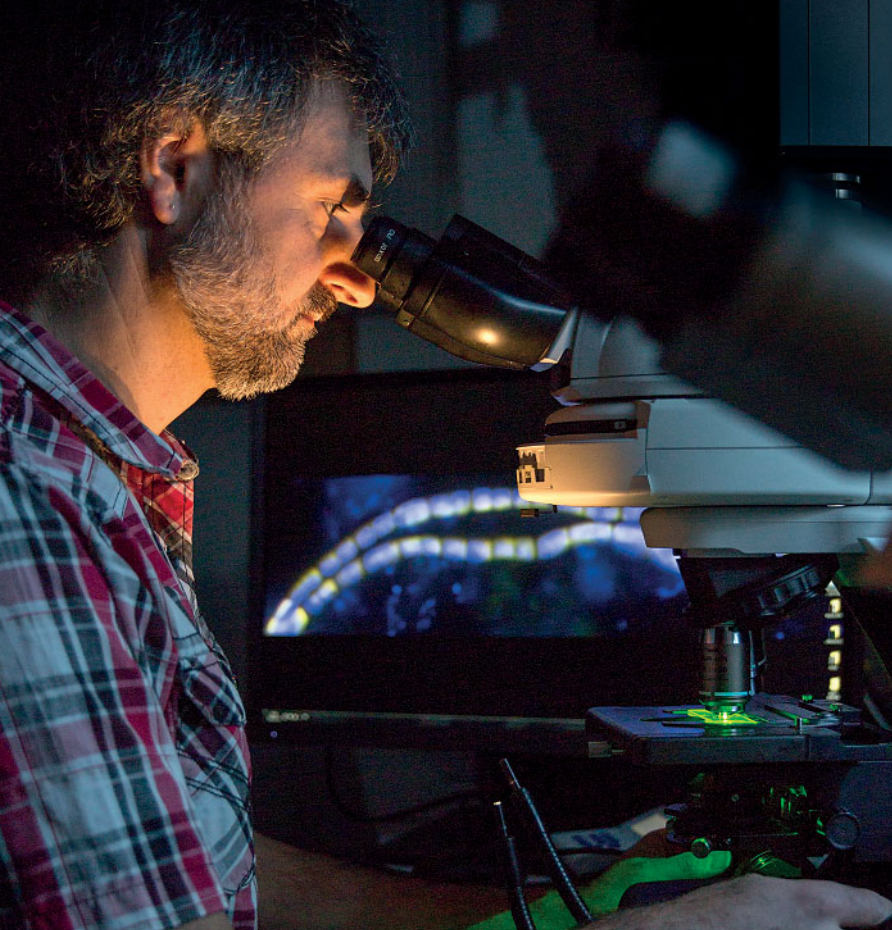
det hele én gang til med samme resultat,« fortæller Lars Peter Nielsen.

Noget elektrisk i sedimentlaget

Lars Peter Nielsen brugte både dag- og nattetimer på at fundere over fænomenet. Det var tydeligt, at ilt aldrig nåede længere ned i sedimentlaget end et par millimeter, før det reagerede med noget. Men det, som det skulle reagere med – altså sulfidet – fandtes først et par centimeter længere nede.

En sen natteime vågnede han med den simple tanke, at når processen ifølge den kemiske ABC var en overførsel af elektroner fra sulfid til ilt, kunne det jo ske som en elektrisk strøm gennem ledninger, der spændte henover den tomme zone mellem sulfid og ilt.

»Jeg tænkte, at det var en helt tos-



↑ Et afgørende forsøg i opdagelsen af kabelbakterierne var, da forskerne skar en sedimentprøve over med en tynd tråd og på den måde "afbrød" strømmen i kabelbakterierne.
Foto: Nils Risgaard-Petersen

← Kabelbakterier set i mikroskop. Professor Andreas Schramm får øje på kabelbakterierne efter at have mærket deres DNA med et fluorescerende stof, der lyser op, når man bestråler det med UV-lys. Foto: Lars Kruse

set tanke, men turde alligevel vende den med min gode kollega professor Niels Peter Revsbech, som er en rigtig dygtig kemiker. Han kunne ikke afvise ideen, og når vi regnede på konsekvenserne af at forbinde sulfidlaget med iltlaget med en ledning, passede beregninger også på det, som vi fandt i laboratoriet,« forklarer Lars Peter Nielsen.

Én af de ting, som skulle finde sted, hvis Lars Peter Nielsens antagelse var korrekt, var, at der skulle ske noget dramatisk med pH-værdien i sedimentlaget. Der skulle blive mere surt i sulfidlaget, hvor elektronerne kom fra, og mere basisk i iltlaget, hvor elektronerne blev deponeret. Det var præcis det, som de havde set i deres forsøg. Da de tjekkede den videnskabelige litteratur, opdagede de, at andre forskere havde fundet det samme uden at kunne give en forklaring.

»Vores var det første studie til at vise, at der er elektriske strømninger i havbunden. Tilbage i 2010 havde vi ingen god forklaring på, hvordan strømmen blev ledt gennem havbunden, men beviserne var klare, og de kunne ikke umiddel-

bart skydes ned af vores kolleger. Vores næste opgave var så at finde ledningerne,« siger Lars Peter Nielsen.

Bakterier var ledninger i sig selv

Ledningerne fandt forskerne i 2012 efter en masse forskellige forsøg med sedimentlag. De skar blandt andet vandret gennem sedimentet og fandt på den måde ud af, at det ledningsførende element måtte være en fast struktur, fordi når de skar i sedimentlaget, stoppede strømmen. De prøvede også at lægge forskellige filtre ind mellem sulfidlaget og iltlaget for at se, hvor store strukturerne måtte være. Her fandt de, at hvis hullerne i filtret var mindre end én mikrometer, stoppede strømmen. Én mikrometer er cirka størrelsen på en bakterie. Det understregede, at forskerne formentlig havde at gøre med ledninger skabt af bakterier. Og rigtig nok fandt de i sedimentlaget masser af RNA af nogle dengang ukendte bakterier – problemet var bare, at ifølge gensekvensen burde disse bakterier ikke omdanne sulfid til sulfat, men gøre det stik modsatte.

Alligevel designede forskere nogle fluorescens-mærkede prober for at kunne finde ud af, hvordan disse bakterier så ud.

Det endelige gennembrud kom, da det lykkedes lektor Nils Risgaard-Petersen at lægge et lag af glaskugler ind mellem iltlaget og sulfidlaget. Da forskerne kunne se, at der gik en strøm mellem de to lag, måtte det strømførende element jo være mellem glaskuglerne. Forskerne brugte deres fluorescens-mærkede prober og spærrede øjnene op, da de kiggede i deres fluorescens- og elektronmikroskoper.

»Vi så filamentøse bakterier med de nu berømte, langsgående ribber. Der indså vi, at bakterierne ikke lavede noget, som var strømførende. De var ledninger i sig selv – levende ledninger,« fortæller Lars Peter Nielsen.

Opdagelsen var et kæmpe chok. På daværende tidspunkt fandtes der ikke nogen beskrivelser af noget tilsvarende i hele biologien. Nanowire kunne være strømførende, men kun over afstande på omkring én mikro-

Det handler om energi

Kabelbakterier står nærmest lodret i sedimentet og forbinder et iltigt lag i den ene ende (foroven) med et sulfidlag i den anden ende. Når kabelbakterien skal bruge energi, tager den elektroner fra sulfid og benytter dem i forskellige biokemiske processer, indtil elektronerne til sidst bliver sendt op og deponeret på et iltatom i den anden ende.

En fascinerende ting ved kabelbakterier er denne arbejdsdeling mellem top og bund. Forskerne mener, at vækst og energi kun bliver skabt i cellerne foroven, mens cellerne foroven ikke laver andet end at bruge ilt og komme af med elektronerne så hurtigt som muligt. Bakterierne sørger for at lave et energilager i cellerne for neden, og når de celler skal op at have en tur med ilt, så har de det lager med sig.

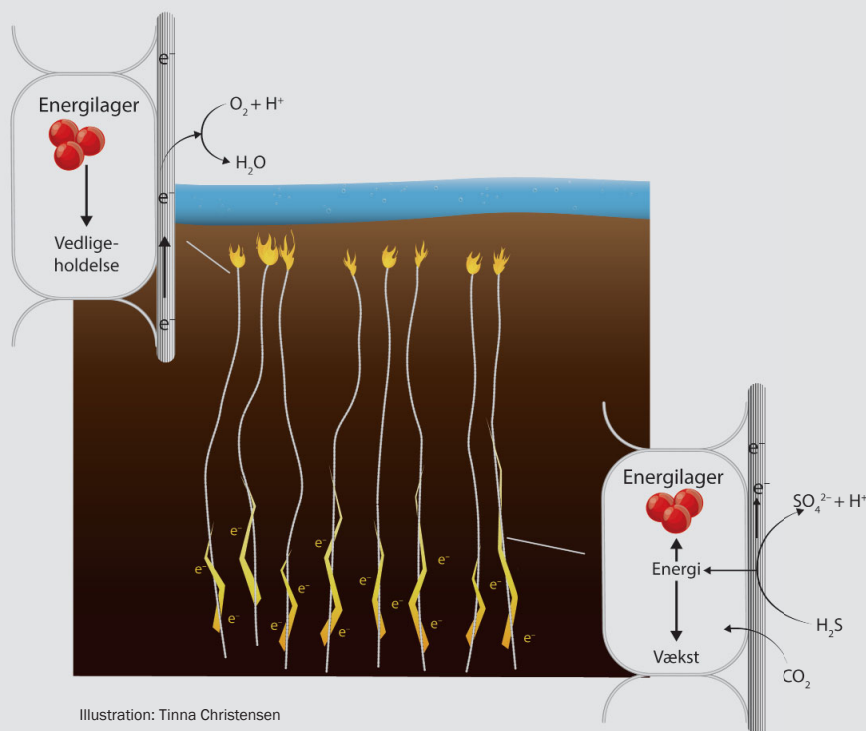


Illustration: Tinna Christensen

meter. Kabelbakterierne var flere tusinde gange større. De levede på en helt ukendt måde.

Flår elektroner af sulfid for at give det til ilt

Siden opdagelsen af kabelbakterierne i Aarhus Havn har forskningen i dem kastet en masse resultater af sig, og forskerne har stablet et helt forskningscenter, Center for Elektromikrobiologi, på benene omkring forskningen i dem. I dag forstår forskerne derfor store dele af kabelbakteriernes biologi og funktion.

Helt simpelt lever kabelbakterien i havbundens øverste sedimentlag. Den er flercellet og kan blive flere centimeter lang med tusindvis af celler i forlængelse af hinanden. Forskerne har indtil videre lykkedes med at hale en fem centimeter lang bakterie ud af sedimentet, men Lars Peter Nielsen tror, at de kan blive endnu længere.

Kabelbakterien står nærmest lodret i sedimentet og forbinder iltlaget i den ene ende med sulfidlaget i den anden. Når kabelbakterien skal bruge energi, tager den elektroner fra sulfidlaget og benytter dem i

forskellige biokemiske processer, indtil elektronerne til sidst bliver deponeret på et iltatom i den anden ende. Når ilt optager en elektron, følger en proton med og omdanner ilt til vand.

»Det er enormt smart, for på den måde udkonkurrerer kabelbakterierne alle de andre bakterier, der har behov for, at iltlaget og sulfidlaget ligger lige op ad hinanden. De har fuldstændigt monopoliseret fortæringen af sulfid. I vores beregninger kan vi se, at når det gælder havbundens samlede iltforbrug, kan kabelbakterierne stå for op imod 80 procent,« fortæller Lars Peter Nielsen.

Kabelbakterier alle vegne

Center for Elektromikrobiologi spytter sammen med forskningscentre rundt om i verden hele tiden nye fascinerende opdagelser om kabelbakterierne ud. Blandt andet viser forskningen, at kabelbakterierne ikke er isoleret til Aarhus Havn. Faktisk findes de over alt i verden, og det er en større nyhed, hvis forskerne ikke finder dem, end når de gør. Det gælder både på land og under vand.

»De ser ud til at være i alle vandløb, søer, kystnære områder og ved varme kilder. Hvis der er iltmangel, er de der. Det gælder også i undergrunden ved grundvandet, når iltten slipper op. Det eneste sted, hvor vi indtil videre ikke har kunnet finde dem, er i de store oceanbunde, hvor iltlaget i havbunden er flere centimeter tykt,« siger Lars Peter Nielsen.

Den store udbredelse gør også, at vi ikke bare taler om én art af kabelbakterier, men mange forskellige arter fordelt over mindst to slægter. Forskerne er netop nu i færd med at kortlægge, hvor de forskellige arter lever, og hvad der er afgørende for, hvem der lever hvor.

Beskytter havbundens dyr mod giftigt sulfid

Et af de mere fascinerende kabelbakterie-fund kommer faktisk slet ikke fra laboratoriet i Aarhus, men fra internationale forskerkolleger. De til dels hollandske forskere undersøgte i et studie mængden af kabelbakterier i sedimentlaget henover en række sæsoner, og deres opdagelser kan være med til at forklare, hvordan sedimentlevende

Amøber spiser kabelbakterier

I foråret 2014 stod professor Lars Peter Nielsen sammen med 20 studerende og kiggede med opspilede øjne på en skærm i undervisningslokalet. Det, de så, var både chokerende og fascinerende. På skærmen var der en voldsom forstørrelse af noget, som foregik under mikroskopet – en amøbe kom krybende ind i skærbilledet og slugte en kabelbakterie, som var det spaghetti på en italiensk restaurant.

Amøbens ageren fik Lars Peter Nielsen til at udsende et jubelbrøl. Lige siden opdagelsen af kabelbakterierne i 2012 havde forskerne nemlig oplevet, at de filamentøse bakterier ikke altid var lige så lette at arbejde med, som forskerne kunne have ønsket sig. Nogle gange forsvandt de simpelthen fra forskernes prøver, uden at forskerne havde nogen idé om, hvor de forsvandt hen. De spekulerede over, om surhedsgraden i muddret

havde været helt skæv, eller om kabelbakterierne manglede mad. Begejstringen i opdagelsen bestod i, at forskerne for første gang havde opdaget en organisme, som åd kabelbakterierne.

Faktisk er amøberne så små, at de slet ikke burde være i stand til at spise de lange kabelbakterier, men amøberne gør meget simpelt det, at de knækker dem sammen og ruller et stykke ind i en vakuole, hvor cellernes næringsholdige indhold suges ud, inden det hele spyttes ud igen – tilsyneladende med ledninger i behold.

Den gode nyhed for forskerne i 2017 var, at de meget let kunne gøre noget ved problemet. De skulle bare smide de bakteriekulturer, som indeholdt amøberne, ud og fortsætte med de kulturer, som var amøbefri.

dyr i mange tilfælde er i stand til at overleve iltsvind.

De fleste dyr i havbunden godt kan overleve uden ilt i forholdsvis lang tid, men de bliver slået ihjel af svovlbrinte, som ofte ses i forbindelse med iltsvind, når iltten ikke længere er der til kemisk at reagere med svovlbrinten.

Kabelbakteriernes kemiske aktiviteter er dog i stand til at mobilisere en masse oxideret jern i overfladen af havbunden. Jernet binder til både svovlbrinte og fosforholdige molekyler, og derved fjernes en del af den giftige svovlbrinte samt fosfor, der kan være årsag til eutrofiering og iltmangel i havbunden.

»Kabelbakterierne spiller på den måde en vigtig økologisk rolle ved at danne en stor buffer i sedimentlaget, og den buffer kan svovlbrinte ikke komme igennem,« fortæller Lars Peter Nielsen.

Genom gemte på overraskelser

Med professor Andreas Schramm i spidsen har forskerne fra Aarhus Universitet også kortlagt kabelbakteriernes genom, og det rummede en masse interessante overraskelser. Blandt andet viser generne, at kabelbakterierne slet ikke benytter

samme enzymer og proteiner til at snuppe elektroner fra sulfid, som andre bakterier gør. De har i stedet udviklet en helt anden måde at gøre det på, og den måde arbejder forskerne netop nu på at lave en model for. I stedet for at benytte den konventionelle metode, ser det ud til, at kabelbakterierne har vendt en proces, som sulfidproducerende bakterier benytter sig af, på hovedet.

Kabelbakterierne har heller ikke de enzymer, som andre iltforbrugende bakterier benytter til at reagere med ilt. Det betyder, at cellerne i den ende af kabelbakterien, som vender op mod iltlaget i sedimentet, næppe får noget energi ud af processen. Bakterierne kører bare elektronerne op langs ledningerne, og så sørger et endnu ukendt enzym for, at elektronerne bliver ført over på iltmolekylerne.

»Faktisk er det kun meget få celler i den ende af bakterien, som sørger for at overføre elektronerne til ilt,« forklarer Lars Peter Nielsen.

Kabelbakterier og miljøgenoprettelse

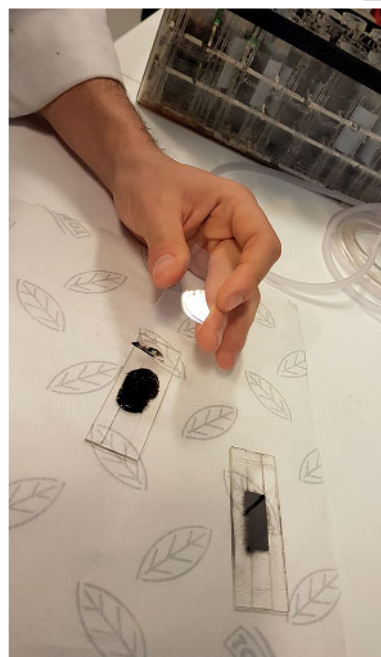
Det interessante spørgsmål er selvfølgelig, hvad man så kan bruge kabelbakterierne til? Her er det vigtigt at slå fast, at forskningen i

kabelbakterier stadig er i de tidlige stadier, men forskerne har alligevel nogle bud.

For det første, er der hele miljøperspektivet. Da kabelbakterierne har så stor betydning for iltsvind og næringsstofcyklusser i hav- og søbund, skal deres bidrag tages med i beregningerne, hvis man vil forudsige, hvordan forskellige forstyrrelser kommer til at få indflydelse på miljøet. Det kan være, at der forekommer iltsvind i en fjord eller lignende, og hvis forskere vil regne på, hvordan livet og kemien i havbunden kommer til at forme sig fremadrettet, er det vigtigt at have kabelbakteriernes bidrag med i ligningen som en afgørende spiller.

På samme måde kan det være vigtigt at tænke kabelbakterier ind i genetablering af vådområder. Hvis man vil genoprette et vådområde, bør man designe det til at have gode betingelser for kabelbakterier, da de ser ud til at hjælpe med at holde miljøkvaliteten høj.

Rismarker er også en form for vådområder, og her har forskerne i laboratorieforsøg for nylig fundet, at emissionen af den vigtige drivhusgas metan var mere end ti gange højere, hvis der ikke var kabelbakterier tilstede.



Ph.d.-studerende Stefano Scilipoti i færd med at klargøre sedimentprøver til mikroskopipræparater, hvor man kan studere bakterierne, mens de er levende og aktive.
Fotos: Maria Blach Nielsen.

Forureningsundersøgelser med kabelbakterier

Et andet interessant og potentielt set praktisk perspektiv ved kabelbakterierne er, at de skaber et elektrisk felt omkring dem, når de flytter elektroner fra den ene ende til den anden. Det elektriske felt påvirker alle salte og ioner i omgivelserne, så de begynder at bevæge sig.

Forskerne har allerede udviklet en sensor, som kan måle på spændingsfeltet, og på den måde kan de fra overfladen se kabelbakteriernes tilstand i undergrunden.

Det viser sig, at de spændingsfelter flugter med nogle erfaringer, man har omkring forurening i undergrunden. Man har set, at hvis der er forurening, så ændres spændingen på overfladen, og det passer med, at bakterierne er i gang med at nedbryde forureningen. På den måde kan man forestille sig, at man med målinger af spændingsfeltet på overfladen kan sige noget om, hvorvidt der er olieforurening eller andet i undergrunden.

Forskerne har netop startet et projekt med støtte fra Innovationsfonden, hvor de vil afdække potentialet i dette. Kan man bruge elektroder på jordoverfladen til at finde forurening i undergrunden, kan man spare en masse dyre boringer.

Kan åbne op for bedre bioelektronik

Det sidste interessante perspektiv, som forskerne dog ikke er kommet så langt med endnu, er inden for bioelektronik.

Evnen til i levende organismer at føre en elektrisk strøm kan have anvendelsesmuligheder inden for blandt andet den medicinske verden, hvor alt fra insulinsensorer og pacemakere til høreapparater og

kunstige lemmer potentielt set kan tilknyttes kroppen og hjernen med biologiske ledninger frem for kobber og plastik. Man kan også forestille sig bionedbrydelig elektronik, som kan indopereres i kroppen, og som så forsvinder med tiden.

»Vi er ikke kommet så langt inden for det her felt, som vi er inden for det med forurening, men det er også noget, som vi arbejder på,« fortæller Lars Peter Nielsen.

Center for Elektromikrobiologi

Center for Elektromikrobiologi blev oprettet i 2017 med en bevilling fra Danmarks Grundforskningsfond. På centeret arbejder 25 forskere og studerende på at forstå kabelbakterierne.

De tre overordnede spørgsmål, som forskningscenteret gerne vil besvare er, hvad der konkret leder strømmen i kabelbakterierne, hvordan bakterierne bruger strømmen og hvilket samspil, de har med andre bakterier og miljøet:

