



# UDFORSKNINGEN AF DE STØRSTE HAVDYBDER

## Om forfatteren



Ronnie N. Glud er professor i Marin Biogeokemi ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet og ved Tokyo Universitet for Marin forskning og Teknologi. Han er leder af grundforskningscenteret *Dansk Center for Hadal forskning (HADAL)*. Hans forskning er centreret omkring omsætningen af organisk materiale, og hvorledes mikrobielle processer vekselsvirker med biologiske, kemiske og fysiske forhold – på mikrobiel og global skala.  
rnglud@biology.sdu.dk

**Teknologiske landvinger har gjort det stadig lettere for forskerne at skaffe sig viden om de dybeste dele af oceanerne under 6 kilometers dybde kaldet den hadale zone. Selvom store dele af dybhavet stadig er udforskere, står det nu klart, at dybhavsprocesser har stor betydning for livet på Jorden.**

Jorden er en blå planet – mere end 70% af klodens areal er dækket af hav med en gennemsnitsdybde på 3,8 kilometer. Dybhavet er således en af Jordens største habitater og har afgørende betydning for livsbetingelserne på vores planet. Dybe havstrømme regulerer temperaturfordelingen og klimaforholdene på Jorden, og biogeokemiske processer i dybhavet regulerer eksempelvis koncentrationerne af ilt og kuldi-oxid i atmosfæren. Dybhavet huser også utallige ukendte livsformer.

Næsten hver eneste dybhavsekspe-  
dition gør nye spændende erkendel-  
ser og finder hidtil ukendte arter og  
biologiske samfund.

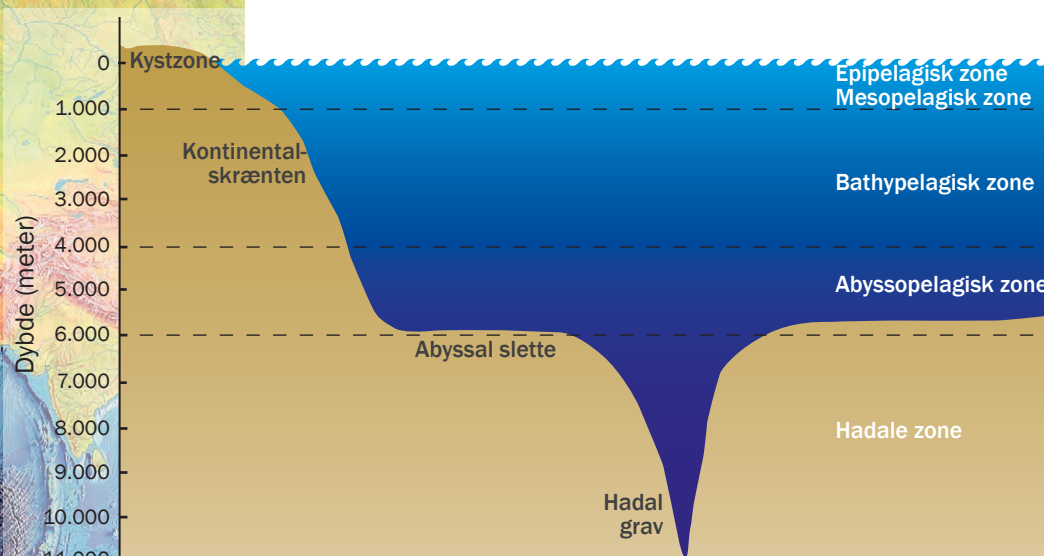
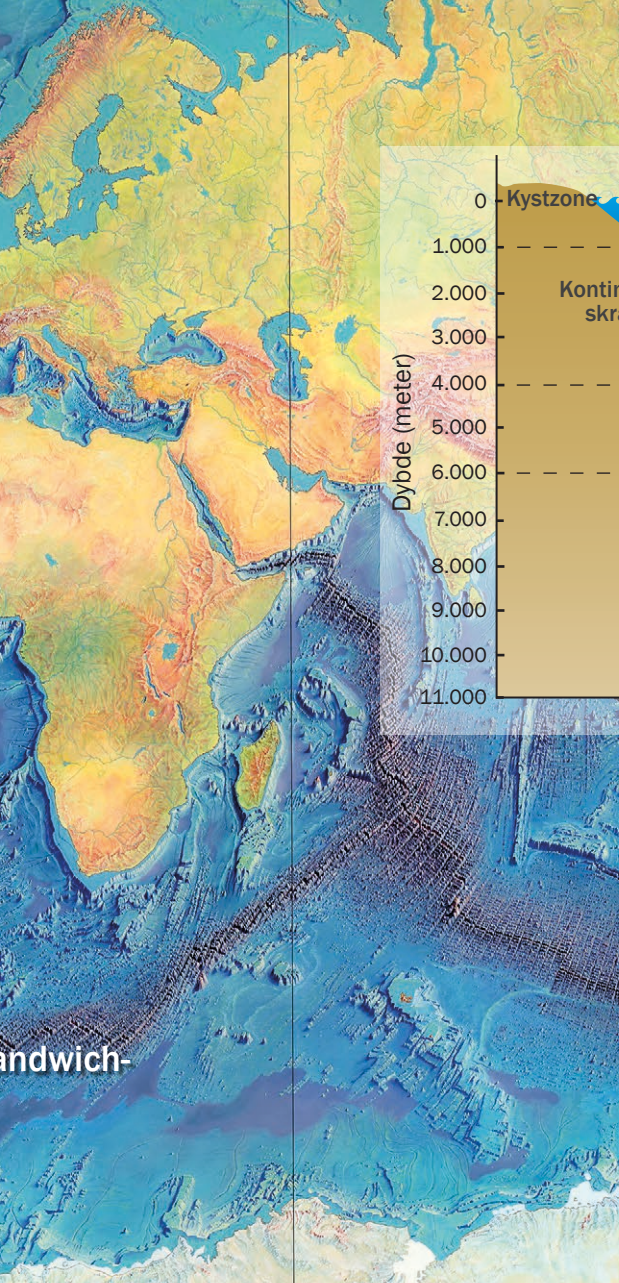
For at forstå Jordens udvikling,  
klimadynamik og biodiversitet er  
det derfor helt centralt at få en  
detaljeret indsigt i livet og ele-  
mentkredsløbene i dybhavet. Det  
meste af dybhavet er imidlertid  
stadig udforsket – det gælder  
især de allerdybeste havområder;  
den hadale zone, der dækker 1-2%  
af verdenshavet og strækker sig

fra 6 kilometers dybde ned til det  
dybeste sted på kloden; Challenger  
Deep i Marianergraven, der når ned  
på 11 km dybde.

## **De hadale grave, en uforstået del af verdenshavet**

Der dannes til stadighed ny hav-  
bund langs enorme undersøiske  
bjergkæder. Her vælder magma  
ud fra Jordens indre og størkner i  
det kolde bundvand, og ved konti-  
nentaldrift glider den nydannede  
havbund gennem oceanerne med  
en hastighed på op mod 5-10 centi-





↑ Kystzonen og de kontinentale skrænter udgør kun en lille del af det globale ocean, der domineres af store abyssale dybhavssletter på 4-6 km dybde. De dækker cirka halvdelen af Jordens areal. De hadale grave dækker kun 1-2 % af havbundens areal, men repræsenterer 45 % af oceanernes vertikale udstrækning; fra 6 til 11 km dybde.

← Der findes i alt 27 hadale grave, hvor den 11 km dybde Marianergrav nok er den mest kendte. Men mange andre hadale grave er mindst lige så fascinerende og inkluderer dem, der er vist på kortet. Baggrundskort: Berann, Heinrich C., Heezen, Bruce C., Tharp, Marie/public domain.

meter per år. Under rejsen dækkes de langsomt af sedimentaflejringer, der udgør et arkiv over forholdene i de overliggende vandmasser. Oceanpladerne støder mod kontinentalpladerne, der bærer klodens kontinenter, og her tvinges de atter ned i jordens indre ved en proces, der kaldes subduktion. Det er her, de hadale dybhavsgreve dannes. Der findes 27 hadale grave, de er i gennemsnit kun 70 kilometer brede, men strækker sig altså tusindvis af kilometer langs subduktionszonerne.

Det har længe været forbundet med store udfordringer at udforske de største havdybder. Men nye tekniske landvindinger har nu gjort det enklere at tage prøver og muligt at udføre eksperimenter og dykke ned til selv de dybeste dele af verdens-

havet. Desuden har erkendelsen af betydningen af dybhavspocesser for livet på Jorden, jagten på forekomster af sjældne mineraler til den grønne omstilling og geopolitiske forhold i de senere år forøget interessen for udforskningen af dybhavet.

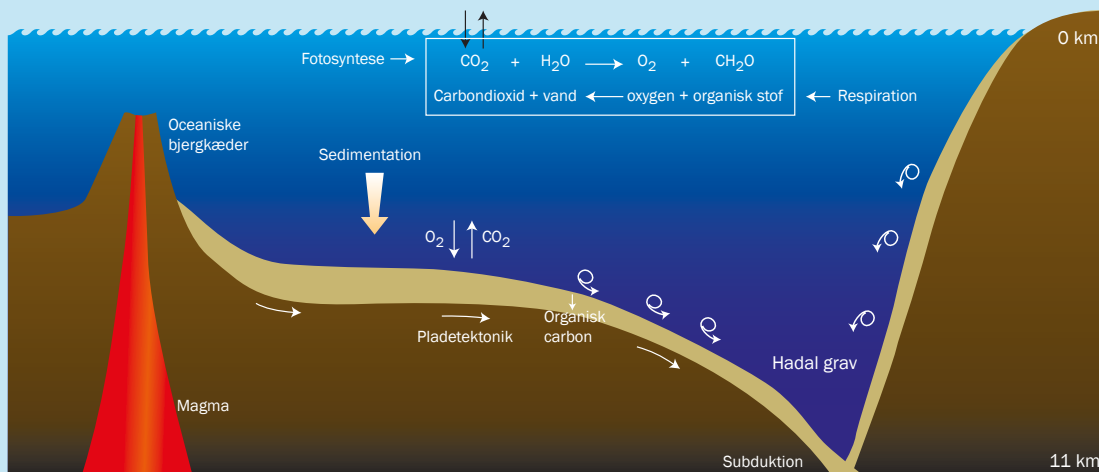
Generelt falder den biologiske aktivitet med havdybden, og oprindeligt troede man ikke, der fandtes liv i dybhavet. Dybhavet er koldt, mørkt, næringsfattigt og påvirket af et enormt hydrostatisk tryk – umiddelbart ikke et indbydende sted for liv. Som navnet antyder, gjaldt denne antagelse især for den hadale zone. Hadal er afledt af ordet Hades, der betegner dødsriget i den græske mytologi. Den nyeste forskning viser imidlertid, at de hadale grave ikke er øde og golde, men faktisk repræ-

senterer biologiske “hotspots” i dybhavet. Graven har en overraskende høj biologisk aktivitet og en stor biodiversitet, og de spiller dermed en stor rolle for eksempelvis carbon- og nitrogenkredsløbet i havet.

### Materialedeponering på ekstrem dybde

Vi ved nu, at de hadale grave er depocentre for organisk materiale. Gravenes V-form betyder, at materiale fokuseres i bunden af gravene, og det har vist sig, at det gradvist stigende tryk hæmmer nedbrydningen af det synkende organiske materiale. Organisk materiale er derfor overraskende næringsrigt, når det lander på store dybder, hvor tryktolerante organismer flourerer.

De hadale grave dannes i områder med høj seismisk aktivitet, og



## De hadale grave

Ny havbund dannes, når magma vælder ud i bundvandet langs oceaniske bjergkæder. De pladetektoniske processer skubber og trækker den nydannede havbund gennem oceanet, mens der akkumuleres materiale (sedimenter) ovenpå, der stammer fra de øvre vandmasser. I overfladen producerer mikroalger oxygen og organisk materiale, der understøtter livet i de frie vandmasser. Men en del af det organiske materiale synker ud som små aggregater, fækalier og ådsler, og dette udgør føden for liv i dybhavet. En del af det organiske materiale, der når havbunden, omsættes, mens den resterende del begravnes. Ultimativt er det effektiviteten, hvormed det sedimenterede organiske materiale om-

sættes under et oxygenforbrug eller begravnes, der regulerer mængden af oxygen og redoxforholdene i oceanerne, atmosfæren og på Jorden. De hadale grave dannes, hvor oceanpladerne støder mod kontinentalpladerne og skydes nedenunder disse. På grund af de hadale graves V-form samt hyppige jordskælv i disse områder føres store mængder af organisk materiale ned i de centrale dele af graven – både fra oceansiden og fra kontinental-skrænten, hvor sedimentet er beriget med materiale fra den produktive kystzone og fra land. De hadale grave er derfor karakteriseret af en høj deponeringsrate af organisk materiale, der både understøtter en høj biologisk produktion og en høj begravelsesrate af organisk carbon.

hyppige jordskælv skaber mudderskred, der transporterer enorme mængder af organisk materiale ned i de dybeste dele af gravene. Således estimeres det, at mere end 1 million tons organisk carbon blev transporteret til de dybeste dele af Japanergraven ved det store Tohoku-Oki Jordskælv i 2011. Lavinerne af mudder udgør en katastrofe for faunaen på gravenes sider, og de døde dyr beriger sedimentet i bunden af gravene med frisk organisk materiale. Efterfølgende tsunamier kan også bidrage til en intens deponering af frisk organisk materiale i gravene. Fire måneder efter Tohoku-Oki jordskælvet var overfladesedimentet på 9,3 kilometers dybde i Japanergraven således beriget med den kortlivede radioaktive isotop <sup>134</sup>Cæsium, der kun kunne stamme fra den nedsmeltede reaktor på atomkraftværket i Fukushima. Det viser, at materiale hurtigt kan transporteres

ned i de dybeste dele af verdenshavet, og at miljøet i de hadale grave er tæt forbundet med forholdene på land og i kystzonen. Sedimentakkumuleringen i de hadale grave er i samme størrelsesorden som rater observeret i kystnære områder, og er langt højere end for dybhavet generelt. Foreløbige beregninger viser, at akkumuleringen af organisk carbon per kvadratmeter er 70 gange større i de hadale grave end på de enorme omgivende dybhavssletter. Så på trods af, at de hadale grave kun dækker 1-2 % af havbunden, kan gravene være uforholdsmæssigt vigtige for havets evne til at lagre organisk materiale og modvirke klimaforandringer forårsaget af afbrænding af fossile brændsler.

### Mikroorganismer i dybet

Men tilførslen af relativt næringsholdigt, organisk materiale stimulerer altså også den biologiske

aktivitet i de dybe grave. Målinger med undersøiske robotter har vist, at iltforbruget i de hadale sedimenter er langt højere end på de omgivende dybhavssletter. Det afspejler en stærkt forøget mikrobiel aktivitet i de dybe grave. Tilsvarende er antallet af bakterier, rundorme og andre små organismer langt større på hadal dybde end i dybhavet generelt. Sammenligner vi forholdene i de forskellige hadale grave, er der en tæt kobling mellem antallet af mikroorganismer samt omsætningsraten af organisk materiale til produktiviteten i overfladeoceanet over de enkelte grave. Det betyder, at regionale variationer i den biologiske produktion i havoverfladen afspejler sig i livsbetingelserne helt ned på 8-11 kilometers dybde – og at klima-inducerede forandringer i overfladeproduktionen vil påvirke de biologiske samfund – selv på de allerstørste havdybder.



## Udstyr til de største dybder

De store dybder og det ekstreme tryk gør det vanskeligt at udforske dybhavet og den hadale verden. Prøver indsamlet i dybet vil ofte være påvirket af tryk og temperaturforandringer, og målinger ombord på et skib vil ikke nødvendigvis afspejle de faktiske procesrater i dybet. Derfor har forskere udviklet en række autonome instrumenter – såkaldte *landere* – der kan frigøres fra et skib og gennemfører målinger og eksperimenter direkte i dybet. Et typisk eksempel på et landerinstrument ses her. Dette specifikke instrument er udviklet til at føre små sensorer ned i havbunden, der kan kortlægge iltfordelingen i sedimentet. Data kan blandt andet buges til at kvantificere havbundens oxygenforbrug.

Grafen viser et eksempel på, hvorledes oxygen trænger længere ned i havbunden på den abysale slette end i den dybe hadale grav – hvilket afspejler en større biologisk aktivitet på den største havdybde.

En lander er typisk 3-4 meter høj og vejer op mod et ton ved udsætningen. Den synker ned i dybet på grund af ballast, der slippes, når missionen er fuldført. Trykstabil opdriftsmateriale i landeren sørger derefter for, at instrumentet stiger op mod overfladen. Her udsender instrumentet et signal, der opfanges på moderskibet, og landeren tages ombord med sin last af data og prøver.

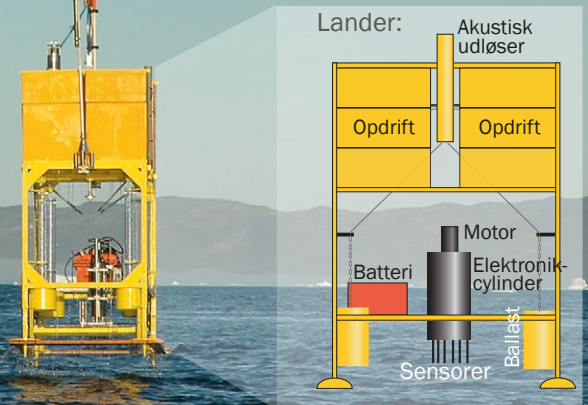
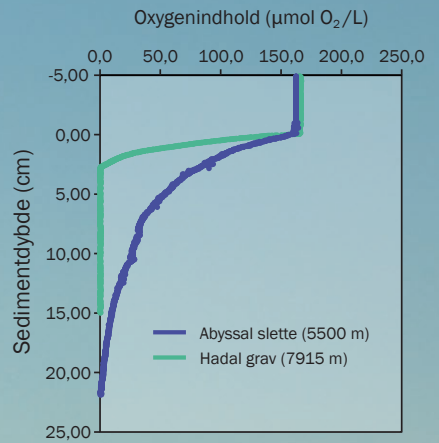


Foto: Søren Rysgaard

Mere sofistikerede instrumenter som ROV's (Remote Operating Vehicle), der er forbundet med et kabel til moderskibet, samt bemandede ubåde giver andre umuligheder for udforskningen af livet i dybet. Men de er også betydeligt vanskeligere og omkostningsfyldte at udvikle og operere. Der findes pt ingen ROV's og kun to ubåde, der kan operere i de dybeste dele af verdenshavet. På billedet ses en af disse – den kinesiske ubåd *Fendouzhe*.

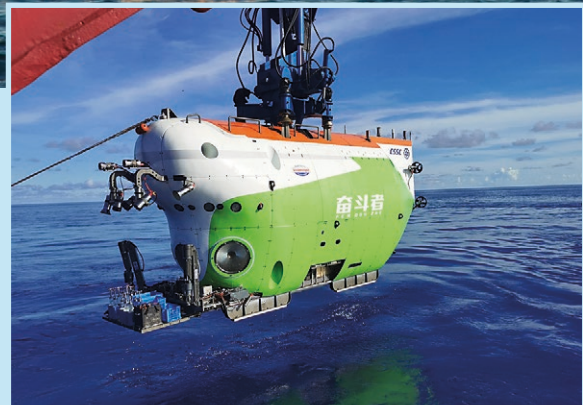


Foto: Global Times

Den generelt høje biologiske aktivitet i hadale sedimenter gør, at ilten kun trænger få centimeter ned i havbunden, og at størstedelen af det hadale mikrobielle samfund lever i en iltfri verden. Det står i skarp kontrast til forholdene på de store dybhavssletter, hvor ilten trænger langt ned i havbunden, og respiration med ilt er den altdominerende proces for nedbrydning af organisk materiale. Den overraskende tynde iltede zone har stor betydning for redox-forholdene, omsætningen og mobiliteten af vigtige bioelementer som nitrogen, fosfor

og spormetaller på de største havdybder. Eksempelvis har det vist sig, at hadale bakterier i det iltfrie sediment fjerner store mængder af biotilgængeligt nitrogen ved en proces kaldet anammox (anaerob ammonium oxidation) – der første gang blev erkendt i "spildevand" i 1990'erne. Om end de biogeo-kemiske forhold på mange måder er særegne, ligner de mikrobielt medierede nedbrydningsprocesser i de hadale dyb, tilsyneladende forholdene i kystzonen meget mere end i det øvrige dybhav. Dog forløber de mikrobielt medierede

processer på hadal dybde under et ekstremt hydrostatisk tryk, der formodentlig kræver, at bakterierne har særligt tilpassede enzymesystemer, membraner, cellevægge og transportsystemer.

De hadale mikrober er distinkt forskellige fra mikrober på lavere vand – men tilsyneladende er de mikrobielle samfund i de respektive hadale grave også meget forskellige. De hadale mikrober udviser også en overraskende stor diversitet. Tilpasning til ekstremt tryk er således ikke en evolutionær





## Ådselsædere i dybet

En næringskilde for livet i de hadale grave er ådsler, der synker ned fra overfladeoceanet. Ådselæderne kan studeres ved at nedsænke døde fisk foran et kamera og følge de organismer, der ankommer for at tage for sig af retterne. På abyssale dybder domineres festen af fisk, men kommer vi ned på de hadale dybder, overtages denne niche af krebsdyr som gigantiske tanglopper. Fysiologien hos fisk begrænser deres dybdeudbredelse til cirka 8 km, mens krebsdyr er bedre til at tilpasse sig det ekstreme tryk i den hadale zone.

Fotos: Alan Jamieson



flaskehals for mikrobielt liv. Muligvis spiller en horisontal gentransport mellem bakterier, medieret af bakterie-inficerende virus, en vigtig rolle for effektiv tilpasning til forholdene i dybet? Der er stadig meget at lære om tilpasning og evolution af mikrobielt liv på de store havdybder.

### Højere liv i de hadale grave

Repræsentanter fra de fleste faunagrupper har tilpasset sig det ekstreme tryk i de hadale grave. Mange hadale arter er endemiske og findes altså kun i de dybe grave. Det er stadig uklart, i hvilken udstrækning de biologiske samfund i de respektive grave er genetisk isoleret, eller hvor stort spredningspotentialet er for forskellige faunagrupper. Der er tilsyneladende eksempler på både distinkt isolering og spredning mellem forskellige grave formodentlig via dybe havstrømme, der således dikterer intensiteten og retningen for spredningen af hadale organismer.

Den hadale fauna er imidlertid fattig på visse grupper såsom søpunge og søstjerner, mens andre er stærkt overrepræsenteret som eksempelvis søpølser. En markant observation er manglen på fisk på de allerstørste havdybder. Der findes ganske vist flere hadale fiskearter, alle stammer fra familien *Ringbugge*. Dybdegrænsen for fisk ligger i omegnen af 8 kilometer, da deres fysiologi ikke gør det muligt at leve ved et højere tryk. Den dybeste veldokumenterede observation af en fisk blev gjort på 8336 meters dybde i Izu-Ogasawara-graven af et internationalt forskningshold den 15. august 2022. Kort efter lykkedes det holdet at fange to individer af en anden fiskeart på 8022 meters dybde i Japanergraven.

Krebsdyr er mere resistente mod ekstremt tryk, og de udgør den helt dominerende og mest diverse faunagrupper på de største havdybder. Således har tanglopper (amphipo-

da) overtaget den biologiske niche som ådselædere af større dyr, der lander i gravene. Tanglopperne er meget succesfulde og kan nå imponerende størrelser på mere end 20 centimeters længde. Livet har således tilpasset sig de ekstreme forhold i dybet – langt fra havoverfladen og kystzonen, og det var derfor også højst overraskende, da man fandt markant forhøjede koncentrationer af miljøfremmede stoffer i den hadale fauna. Eksempelvis viste amphipoder på 10 kilometers dybde meget høje koncentrationer af industrielt produceret PCB (Polychlorineret Biphenyl).

### Menneskeskabt forurening på de største havdybder

Det er altså ikke kun organisk carbon, der deponeres, fokuseres og akkumuleres i de hadale grave, miljøfremmede stoffer finder også vej til de fjerneste afkroge på kloden. Således er der fundet stærkt forhøjede koncentrationer af kviksølv i både





Foto: Thomas Walter



Foto: Anni Glud



Foto: Matthias Zabel

## Sedimentkerner

Relativt uforstyrrede sedimentkerner kan udtages med en såkaldt multiplecorer, som ses på billedet. De lagdelte kerner afspejler blandt andet hændelser som askelag dannet af vulkanudbrud eller sedimentlag dannet af laviner induceret af jordskælv. Opskæringen af prøverne og efterfølgende analyser og sedimentdateringer giver indsigt i mange biogeokemiske processer og afslører for eksempel fordelingen af spormetaller, forurenede stoffer og begravelsesraten af organisk carbon i havbunden.

fauna og sediment i flere hadale grave. Tilsvarende indeholder overfladesedimentet i Atakama- og Kermadecgravene høje koncentrationer af PCB, der blev forbudt i 1970'erne.

I lavvandede havområder er sedimentlag med høje PCB-koncentrationer ofte begravet under sedimentoverfladen, men i de hadale grave findes PCB tæt på sedimentoverfladen. Det afspejler formodentlig, at de svært nedbrydelige miljøfremmede stoffer efter en forsinkelse og langt efter produktionsforbuddet, nu har nået de hadale dybder. De relativt høje koncentrationer af miljøfremmede stoffer i det hadale miljø skyldes formodentlig en bioakkumulering via ådsler som hvaler og store fisk, adsorption til synkende partikler og den før omtalte seismisk inducerede transport af sediment fra lavere dybde. Man kan nok forvente, at koncentrationen af miljøfremmede stoffer i de hadale grave vil stige i de kommende år.

Det er kun indenfor de seneste 5-10-år, at det har været teknisk muligt for bemandede ubåde rutinemæssigt at dykke ned i de hadale grave – og med antallet af dyk øges vores forståelse af den hadale zone, men også antallet af observationer af menneskelig påvirkning. Det er forstemmende at se plastikposer flyde forbi ubådens vinduer på 10 kilometers dybde og finde mikroplastik i den hadale fauna. Sidste år blev dybhavsforskning beriget med en ny term; "Müllspuren" (oversat fra tysk: affaldsspor). Termen er afledt af "Lebensspuren", der dækker over spor efter fauna i havbunden, og som findes i både moderne sedimenter og i fossile aflejringer, hvor de giver et indblik i udviklingen af liv og adfærd gennem geologiske tidsaldre. Lange lige aftryk i de hadale overfladesedimenter havde imidlertid undret forskerne, indtil observationer på 10 kilometers dybde i Filippiner-graven viste, at det skyldtes

aftryk fra drivende plastikposer, der blev trukket over havbunden med strømmen. De hadale grave er således ikke isolerede habitater langt fra menneskeskabte påvirkninger, men bærer tydelige præg af den Antropocæne tidsalder.

### Mange nye opdagelser venter

De hadale grave er unikke habitater med særegne livsformer, der har udviklet sig under det ekstreme tryk. Men det er også habitater, der tilsyneladende har uforholdsmæssig stor betydning for oceanernes elementkredsløb og ikke kan forstås ved at ekstrapolere vores viden om det øvrige ocean. Gravene er overraskende diverse og dynamiske og tæt koblet til variationer i overfladeoceanet og måske langt mere sårbare overfor menneskeskabte påvirkninger end tidligere antaget. Men udforskning af gravene er kun lige begyndt, og der er stadig mange opdagelser at gøre på de største havdybder. ■

**Videre læsning:**  
Forskningscenteret HADAL:  
[www.sdu.dk/hadal](http://www.sdu.dk/hadal)