

DYBHAVETS VÆRDIFULDE MANGANKNOLDE

Manganknolde ligger spredt på den 4 km dybe havbund i det østlige Stillehav. Foto: ROV-Team/GEOMAR (CC BY 4.0)

Om forfatteren



Julia M. Otte er uddannet i biovidenskab og geovidenskab ved universitetet i Heidelberg, universitetet i Freiburg og universitetet i Tübingen (Tyskland) med speciale i molekylærbiologi og mikrobiologi. Som postdoc i Max Planck Institutet og Alfred Wegener Institutet (Bremen, Tyskland) har hun forsket i virkningerne af dybhavsminedrift på dybhavsmikroorganismer i Stillehavet.

Siden marts 2021 har Julia været ansat som postdoc ved Center for Elektromikrobiologi ved Aarhus Universitet, hvor hun arbejder med sørestaurering og slamfjernelse ved hjælp af elektrogene bakterier.

Som fremtidig Marie Curie Stipendiat vil Julia på Aarhus Universitet arbejde med at opnå en bedre forståelse af dannelsen af drivhusgassen N_2O .

juliaotte@bio.au.dk

På havbunden i dybhavet findes vidtstrakte områder oversået med kartoffelstore knolde, som er rige på værdifulde metaller. Der er store kommercielle interesser i at høste disse manganknolde, som de kaldes, men hermed risikerer vi også at ødelægge et unikt levested for dybhavsorganismer, som vi endnu ved meget lidt om.

Dybhavet har fascineret mennesket siden de tidlige odysseer over havene, og mange myter er blevet fortalt om havets dybder. Søfarende har berettet om mystiske væsner som havruer og søslanger, som forskningstogter i moderne tid ikke just har kunnet bekræfte eksistensen af. Men det er nu ikke fordi, dybhavet ikke rummer mange fantastiske beboere – dybhavsdjævel, dybhavsagurk, zombieorm, dragefisk og kikkertfisk er blot nogle få eksempler.

Dybhavet er et meget anderledes sted, fyldt med mærkelige livsformer. Men hvor meget ved vi egentlig om, hvad der er dernede? Ikke særlig meget! Cirka 95% af oceanerne er stadig uudforsket, hvoraf størstedelen er dybhav. Det kan lyde paradoksalt, at vi ved

mere om månen end om det dybe hav på vores planet.

Grænsen til dybhavet sættes typisk ved 1000 meter, hvor det uendelige mørke starter, fordi stort set intet lys når ned på denne dybde. Herne er temperaturen faldet til $3,8^{\circ}C$, hvor den og holder sig mere eller mindre konstant. Trykket på disse dybder varierer fra omkring 40 til over 110 atmosfæres tryk. Havbunden ligner en endeløs ørken brudt af talrige undervandsbjerge, og der er på disse dybder næsten ingen næringsstoffer.

Før i tiden troede man, at intet liv kunne overleve uden lys. Vi ved dog nu, at der findes masser af liv dernede på trods af de ekstreme forhold – ikke mindst mikroorganismer, men også dybhavskoraller, fisk og mange andre gennemsigtige

(nogle er endda farvede) bizarre væsner. På de store havdybder kan det næsten virke, som var man på en anden planet.

At udforske dybhavet er en stor udfordring, men havforskere arbejder dedikeret på at dokumentere, hvad der findes i dybet, før vi måske i værste fald ødelægger det.

Metalrige knolde på havbunden

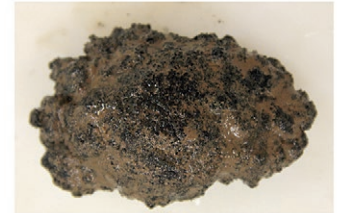
De første kendte globale havforskningsekspeditioner var den britiske Challenger-ekspedition fra 1872-1876, som udførte de første systematiske undersøgelser af havbunden og indsamlede talrige hidtil ukendte organismer. Men man opdagede også, at der på Stillehavets bund fandtes kartoffel- eller blomkålsformede knolde, der var rige på mangan og en række andre metaller. I takt med, at nye



Top view



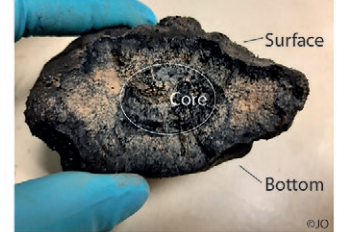
Bottom view



Side view

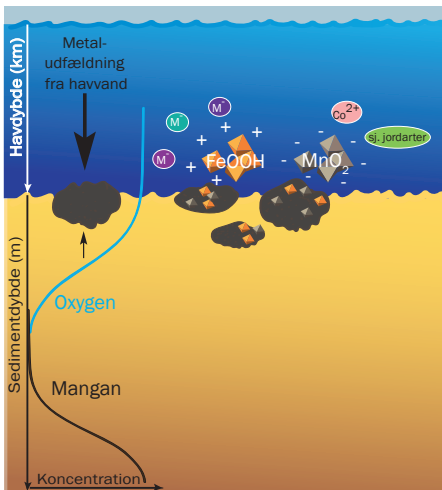


Cross-section

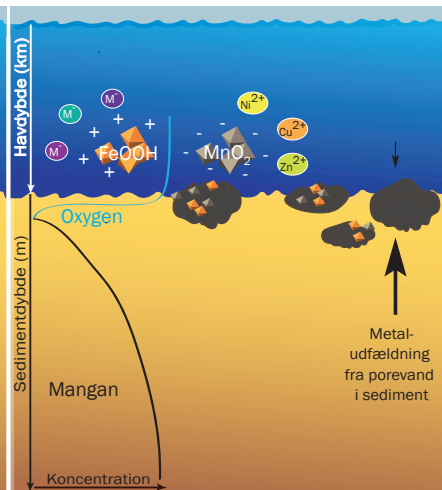


Julia M. Otte i færd med at vælge manganknolde til sine undersøgelser. På nærbillederne af en af knoldene kan man se et tværsnit, som viser at knolden vokser i ringe som et løg. Væksthastigheden er cirka 1 mm på 1 million år. Fotos: Julia M. Otte

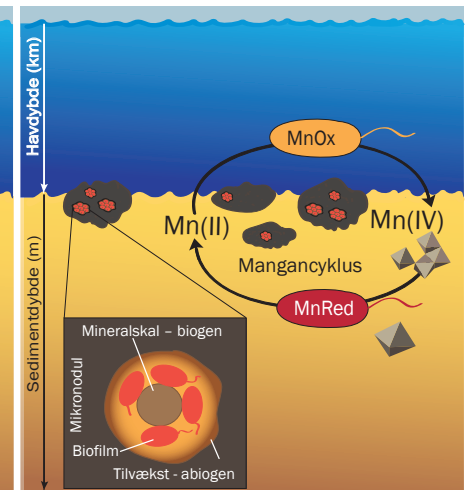
Oxisk - hydrogenetisk vækst



Suboxisk - diagenetisk vækst



Biologisk drevet vækst ?



Illustrationerne viser de forskellige måder, forskerne mener, at manganknolde på havbunden kan vokse på. Metaller kan udfældes på knoldene fra vandsøjlen eller fra porevandet i sedimenterne under knoldene. En ny hypotese er, at mikroorganismer kan stimulere væksten af manganknoldene, men dette er endnu ikke undersøgt i detaljer. Da manganknolde vokser ekstremt langsomt er det meget svært at simulere deres vækst i laboratoriet. Illustration: Julia M. Otte

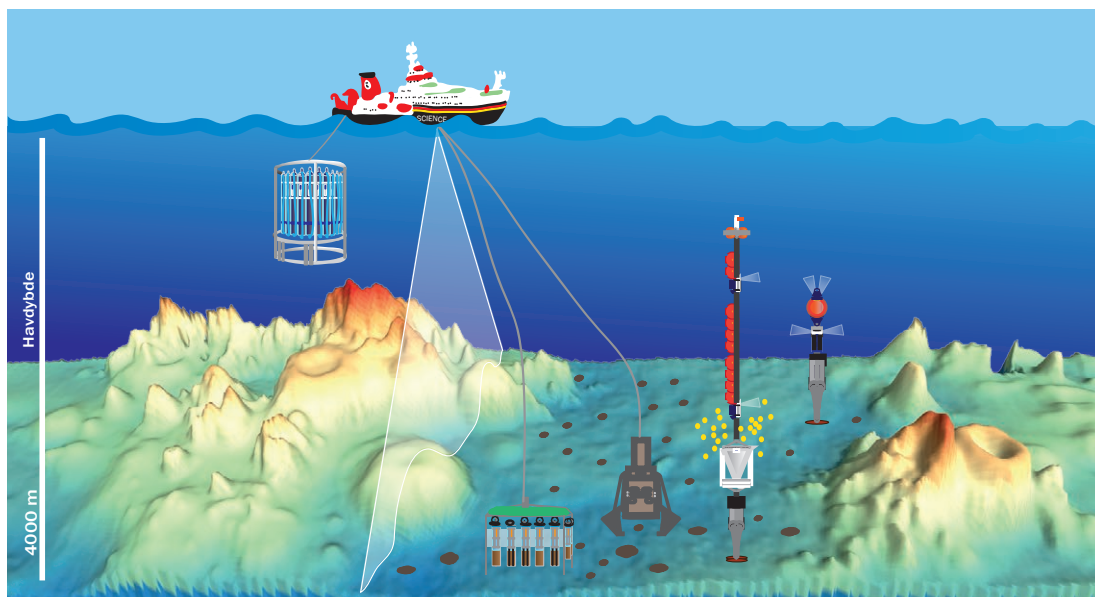
havområder blev udforsket, opdagede man flere mineralforekomster på dybhavs bunden, herunder områder med de omtalte manganknolde (også kaldet mangannoduler), områder med massive sulfider i havbunden og koboltrig havbundsskorpe. Den største kendte forekomst af manganknolde, som har et økonomisk bæredygtigt indhold af kobber, kobolt, aluminium, nikkel og sjældne jordarter, findes i den såkaldte Clarion-Clipperton brudzone i det nordøstlige Stillehav mellem Hawaii og Mexico – et område cirka på størrelse med Europa.

Der er stor interesse for disse aflejringer af manganknolde, fordi de

indeholder større mængder af visse metaller, end der findes i andre kendte forekomster, det er muligt at udvinde. Det antages eksempelvis, at de globale forekomster af manganknolde på havbunden indeholder væsentligt mere mangan end forekomster på land. Den samlede vægt af manganknoldene i Clarion-Clipperton brudzonen er anslået til omkring 21 milliarder tons.

Aflejringer af manganknolde forekommer udbredt på havbunden ved dybder på 4-6 km, og siden begyndelsen af 1970'erne er der udført adskillige videnskabelige

undersøgelser for at vurdere resourcepotentialen i områder med manganknolde. Den økonomiske interesse for manganknoldene er drevet af, at de indeholder mange metaller som kobber, lithium, titan og sjældne jordarter, der bruges i moderne teknologi som smartphones, bærbare computere og fladskærms-tv'er. Og den grønne omstilling driver yderligere efterspørgslen på disse metaller til brug i solceller, magneter i vindmøller og elbil-batterier. Det stigende behov kombineret med udtømmingen af de kendte landbaserede malmforekomster af høj kvalitet gør, at mange kigger sultent mod havbunden.



Når forskere undersøger havbunden i et manganknoldfelt, foretages der flere typer målinger. Først kortlægges havbunden med sonar, der placeres udstyr på havbunden for at måle bundstrømmene, og sedimenterne fanges for at kvantificere partiklernes synkehastighed. Forskerne har også udstyr til at indsamle vandprøver, sedimentprøver og manganknolde fra havbunden, som analyseres om bord på skibet. Forskere undersøger primært de første 5 m af den dybe havbund.

Illustration: Julia M. Otte.

Sådan vokser manganknolde

Siden man opdagede de store forekomster af manganknolde af Clarion-Clipperton brudzonen, har forskere fokuseret på at forstå manganknoldenes oprindelse og vurdere deres ressourcepotentiale. Da havbunden i Clarion-Clipperton brudzonen findes på mere end 4000 meters vanddybde, aflejres sedimenter på havbunden her ganske langsomt – det vil sige med en hastighed på mindre end 1 centimeter per tusind år. Denne meget langsomme aflejringshastighed fremmer væksten af manganknolde. Dannelsen af manganknolde kræver en vækstkerne, som kan være fragmenter af vulkanske klipper eller biologisk materiale såsom hjaltænder eller et stykke muslingeskal. Hovedbestanddelene af manganknoldene – jern og mangan – dannes som lag af oxider omkring kernen i iltrigt havvand ved havbunden. Under dannelsesprocessen optages forskellige metaller fra havvandet på overfladen af manganoxiderne, hvilket over tid fører til, at knolden bliver beriget med metaller. På den måde kan knoldene vokse omkring 2 millimeter over en million år.

De fleste manganknolde fundet i Clarion-Clipperton brudzonen viser vækstlag af forskellig oprindelse og væksthastigheder. Knoldene tilføres ikke kun metaller fra havvandet, men kan også vokse ved at adsorbere metaller, som frigives i iltrige sedimenter umiddelbart under knoldene ved mikrobiel nedbrydning af organisk stof.

Endelig har der også været perioder med særlige miljøforhold, hvor knoldene er blevet forsynet med metaller fra dybere sedimenter, som blev transporteret af sedimentets porevand. I disse perioder voksede knoldene meget hurtigere – op til 250 millimeter over en million år

Unikt habitat for mikroorganismer

Udover at afklare de geokemiske dannelsesmekanismer for manganknoldene, har de nyere undersøgelser også afsløret, at manganknoldene udgør et unikt levested for mikrobielle samfund. Disse mikrobefund knyttet til manganknolde er domineret af jern- og mangancirkulerende mikroorganismer, som muligvis spiller en vigtig rolle i kredsløbet af mangan og jern på og inde i knoldene. Dette

biologisk drevne metalkredsløb er endnu ikke fuldt ud forstået, men det kan være relevant for selve dannelsen af manganknoldene, da mikroorganismerne aktivt producerer mangan- og jernoxider.

De hidtidige undersøgelser af manganknoldene og livet omkring dem har haft fokus på geokemiske processer og store organismer. Der er derfor brug for at etablere en basisviden om mikrobefundene og deres økologiske betydning for at kunne vurdere de potentielle effekter af fremtidig minedrift på dybhavs bunden. På nuværende tidspunkt ved man ikke meget om, hvilke effekter industrielle minedriftsaktiviteter vil have på dybhavsøkosystemerne og de geokemiske processer i havbunden. Før industriel udnyttelse af manganknolde på dybhavs bunden finder sted, er det derfor vigtigt at udforske områderne med manganknolde og om nødvendigt beskytte dette unikke habitat.

Minedrift i dybhavet

I løbet af de næste 30 år forventes den globale befolkning at vokse med to milliarder mennesker. Og i 2050 vil to tredjedele af alle men-

Mikroorganismerne i dybet

Hvis man tager et nærmere kig på sedimenterne på bunden af dybhavet og vandet lige ovenover, vil man opdage en mangfoldighed af liv i form af encellede organismer – bakterier, arkæer, svampe, protozoer og vira – der trives her trods det ugæstfrie miljø. En dråbe havvand rummer mere end en million bakterier og en teskefuld havsediment indeholder mere end en milliard.

Intet lys trænger ned til havbunden i dybhavet, og de fleste af de organismer, der lever der, er derfor afhængige af organisk materiale, der produceres længere oppe i vandsøjlen, hvor der er lys nok til, at der kan foregå fotosyntese (den fotiske zone), og som efterfølgende synker ned på havbunden. Af den grund antog videnskabsfolk tidligere, at der ville være meget sparsomt med liv i det dybe hav. Men når man undersøger prøver hentet op fra dybhavbunden, rummer de stort set alle masser af liv.

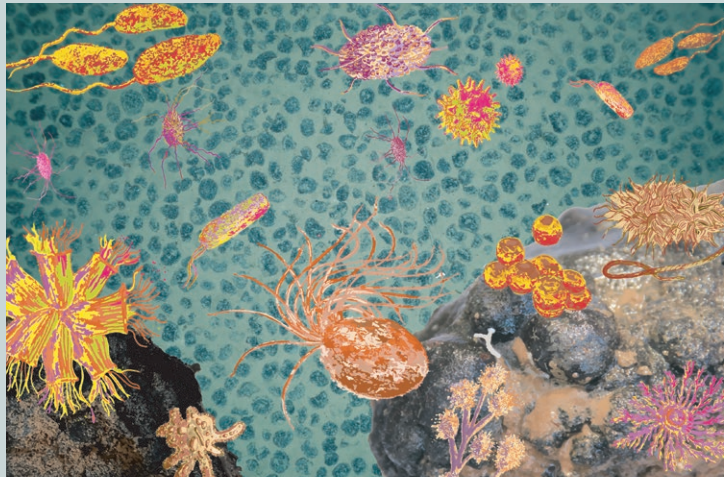


Illustration: Julia M. Otte.

Manganknoldefelt med fotos af manganknolde. Forskellige typer af mikroorganismer er vist.

Dybhavssedimenter rummer den største mængde bakterier, arkæer og vira på Jorden, og diversiteten af mikroorganismer er potentielt meget høj. Det er blevet estimeret, at så meget som en tredjedel af Jordens samlede levende biomasse udgøres af mikroorganismer i undersøiske sedimenter.

Mikroorganismernes antal i un-

dersøiske sedimenter og potentielle økologiske betydning står i kontrast til, hvor lidt vi ved om dem. Diversiteten i mikroorganismernes stofomsætning, sammensætningen af artssamfund og dennes variation på tværs af miljøer er stort set ukendt. Men at forstå mikroorganismernes fordeling og aktiviteter er afgørende for at forstå livet på Jorden.

Undersøgelser af dybhavsbunden

Sedimenterne på bunden af dybhavet består generelt af små partikler af biologisk oprindelse – det vil sige fragmenter, skaldele og afføring fra organismer, som synker ned på havbunden fra det produktive overfladehav. Derudover består sedimentet også af uorganisk materiale i form af mineraler, der er transporteret fra landjorden via floder eller med vinden eller stammer fra vulkansk aktivitet. Når vi befinder os 1000 kilometer fra land, er tilførslen af materiale fra land meget lille, og samtidig er den marine produktion i overfladevandet betydeligt mindre her end i kystnære områder. Det betyder, at "regnen" af organisk materiale til havbunden på 4000 meters dybde er meget lille – men den udgør ikke desto mindre den vigtigste fødekilde for mikroorganismer, der lever i sedimentet.

For at undersøge, hvordan mikroorganismene kan leve i sedimentet under så ekstreme forhold, hentes sedimentkerner op fra havbunden, som analyseres både geokemisk (næringsstoffer og metaller i porevandet) og mikrobiologisk (for eksempel celledælling, enzymaktivitetstest, identificering af mikroorganismer ved hjælp af DNA og RNA-ekstraktion)

Målingerne ombord giver os et første blik på, hvad der sker i de dybe sedimenter. Vi kan overvåge mikrobiel



Foto: Julia M. Otte

Sedimentprøver fra havbunden.

effektivitet hovedsageligt via tilgængeligheden af ilt i sedimentkernerne. I dybhavets sedimenter er iltforbruget meget lille sammenlignet med lavvandede områder tæt på kysten, hvor der aflejres meget mere organisk materiale.

Forskning i konsekvenser af dybhavsminedrift

I 2019 var jeg som mikrobiolog en del af den 80 personer store besætning på det tyske forskningsskib Sonne, som var på et tre måneder langt forskningstogt til den såkaldte Clarion-Clipperton zone i Stillehavet. Det videnskabelige togt var en del af et fælleseuropæiske projekt, JPI Oceans "Mining impact", som skal tilvejebringe viden om konsekvenserne af dybhavsminedrift og danne grundlag for fremtidige regler på området. Den konkrete anledning var, at virksomheden DEMA på det tidspunkt testede "havbundsstøvsuger" Patania II til indsamling af manganknolde på 4000 meters dybde.

Togtet blev ledet af den tyske forskningsinstitution Geomar, og i april 2021 gentog de samme forskningsgrupper deres undersøgelser på et nyt togt. Overordnet gik undersøgelserne ud på at studere mikrobefundene på dybhavs-bunden – hvilke mikroorganismer findes der, og hvordan varierer sammensætningen af mikroorganismer indenfor og mellem områder med manganknolde? Et andet forskningsfokus var på at undersøge partikkelkoncentrationen i den sedimentfane, der hvirvles op i forbindelse med dybhavsminedrift.

Et af de konkrete eksperimenter går ud på at undersøge samfundene af mikroorganismer i havbunden før og efter, at de store og tunge maskiner til dybhavsminedrift har komprimeret havbunden på grund af deres vægt. Her brugte forskerne en almindelig haverive til at løsne sedimentet igen og sammenligne de levende samfund før og efter dybhavsminedriften og før og efter at have brugt haveriven.



Kunstige manganknolde lagt ud på havbunden af forskerne. En dybhavsfisk svømmer forbi. Foto: ROV-Team/GEOMAR

Et andet eksperiment var at teste, om koraller og svampe, der lever fastvokset til manganknoldene i dybhavet, kan bruge keramiske knolde som erstatning, når man har høstet manganknoldene. Da manganknoldene vokser ekstremt langsomt – et par millimeter per million år – vil fastsiddende organismer i praksis blive berøvet deres livsgrundlag, hvis manganknoldene forsvinder. Når forskerne om nogle år genbesøger de steder, hvor de har plantet keramiske knolde, vil det vise sig, om denne metode kan være en brugbar måde at genoprette økosystemet på.

nesker bo i byer. Det kommer til at betyde, at verden får brug for millioner flere vindmøller, solpaneler og batterier til elektriske køretøjer, hvilket vil lægge et enormt pres på metalforsyningerne. I dag udvindes mineraler og sjældne jordarter i miner på land, ofte i fattige områder med børnearbejde, og det har store miljømæssige og sociale omkostninger. Det har rejst spørgsmålet, om det vil være bedre at søge efter råstoffer i dybhavet. Ifølge aktører fra den undersøiske mineindustri repræsenterer havet en langt større og potentielt mere klimavenlig kilde til at udvinde råstofferne end forekomster på land, og de slår på vigtigheden af at sikre omstillingen til vedvarende energi.

I april 2021 blev verdens første pilottest for dybhavsminedrift gen-

nemført på Stillehavets bund i form af den 25 tons tunge robot Nodule collector Patania II. I omkring en time kunne den belgiske virksomhed DEMA køre det enorme køretøj rundt på havbunden, mens der blev indsamlet 110 tons manganknolde. Den næste mission – som er planlagt til år 2024 – vil teste et system bestående af en fuldskala prototype på en manganknold-opsamler sammen med et stigrør, som bringer knoldene op til overfladen.

Fremtidig havbundsminedrift vil involvere en sugepumpe, der trækker manganknoldene op fra havbunden til et skib ovenover. Knoldene vil derefter blive sorteret og de værdifulde mineraler og metaller udvundet, mens skibet stadig er på havet. Alt restmaterialet dumpes tilbage i havet, hvilket vil give en

enorm fane af sediment, der breder sig fra skibet. Det er ikke kun de enorme sedimentfane, der udgør et potentielt miljøproblem – også støj og lysforurening vil påvirke dybhavslivet.

Er fremtiden at høste manganknolde på havbunden?

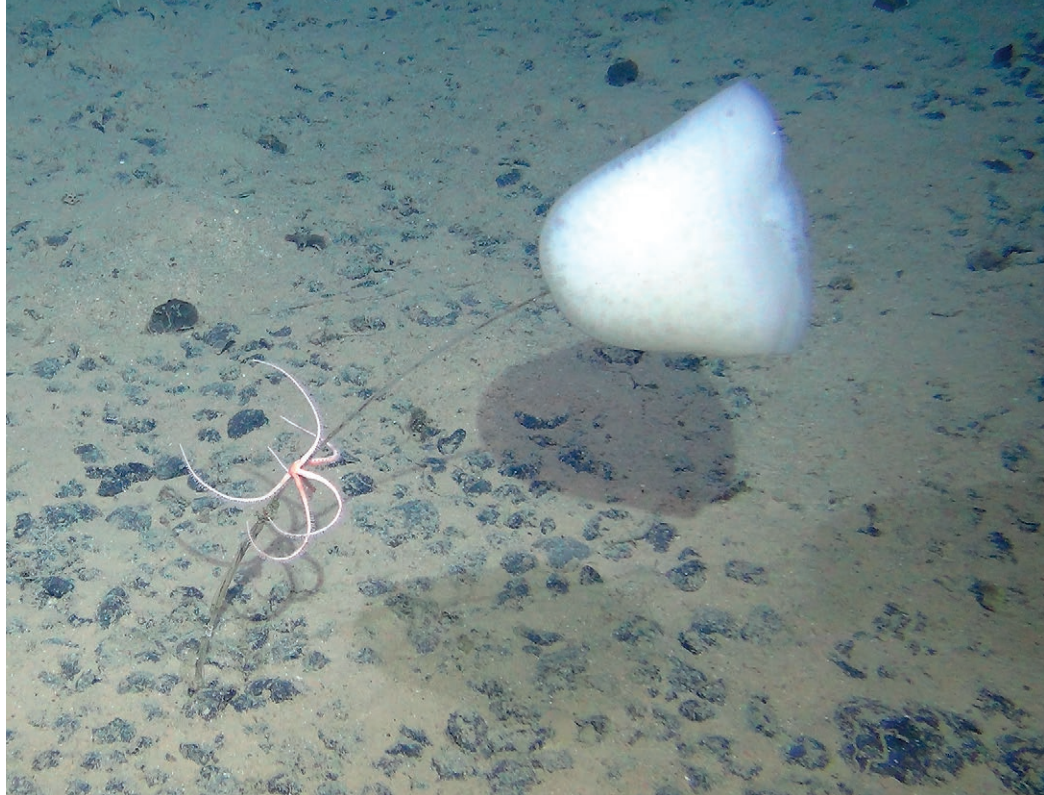
En nylig cost-benefit analyse fra MIT (Massachusetts Institute of Technology) har vist, at udvinding af disse manganknolde er rentabelt med årlige indtægter op til 2,2 milliarder dollars. Det har givet mange stater og virksomheder blod på tanden. Også danske virksomheder er indirekte involveret. Således har den danske stjernearkitekt Bjarke Ingels (fra BIG) for det canadiske selskab *The Metals Company* designet en prototype til en 300 tons "støvsuger" til at samle manganknolde op

fra havbunden samt tilhørende fartøjer og platforme. Tilsvarende har Mærsk Forsyningservice gennem 2018 og 2020 arbejdet sammen med DeepGreen om at tilvejebringe viden til at udvikle en metode til at høste knoldene og udvinde metaller frem på en bæredygtig og miljøvenlig måde.

Situationen i dag er altså den, at vi på den ene side har nogle politikere og virksomheder, der er enige om, at den grønne omstilling afhænger af, at virksomheder og aktører tør gå nye veje for at vinde klimakampen – og at minedrift på havbunden i den forbindelse kan være et mere miljøvenligt alternativ til minedrift på land. På den anden side har flere havforskere, politiske eksperter og ngo'er underskrevet erklæringer for at standse planer om dybhavsminedrift. Deres resultater viser, at dybhavsminedrift kan medføre tab af biodiversitet og økosystemfunktion, som vil være irreversible over flere generationer og have ukendte konsekvenser for kulstofbindingsdynamikken og kulstoflagring i dybhavet.

Indtil videre har EU foreslået at bremse mineeksperimenter i europæiske farvande, mens virksomheder som Google, Volvo, BMW, Philipps og Samsung har støttet Worldwide Fund for Nature's opfordring til at stoppe offshore minedrift. Andre virksomheder som Microsoft, Ford Automotive, GM og Rivian har taget skridt for at sikre, at mineraler hentet gennem dybhavsminedrift ikke vil blive brugt i deres forsyningskæder, men har endnu ikke tilsluttet sig kravet om et politisk moratorium. I de kommende år skal det internationale organ ISA (International Seabed Authority) tage stilling til, om der skal gives grønt lys til at starte en egentlig minedrift.

Denne debat er yderst relevant, og emnet vil også blive diskuteret i Danmark til maj, hvor København er vært for Global Dredging Summit, der dækker diskussioner om dybhavsminedrift. ■



↑ Det er en meget følsom muddermalle (hvid: hexactinellid *Hyalonema* sp.), som vil lide mest under dybhavsminedrift og den tilhørende fauna (pink: *Brisingida*). Foto: ROV-Team-GEOMAR

← Et mærkeligt væsen (en søgurk) indsamles med ROV-armen (= fjernstyret fartøj). Foto: ROV-Team-GEOMAR

Internationalt samarbejde om havbunden

I 1994 blev International Seabed Authority (ISA) dannet som et mellemstatsligt organ under De Forenede Nationers havretskonvention. Et af de grundlæggende juridiske principper i ISA er, at havbunden og dens ressourcer er "menneskehedens fælles arv". Det betyder, at myndigheden ikke kun har ansvaret for at beskytte havmiljøet, men også for at sikre en retfærdig fordeling af proventet fra enhver økonomisk aktivitet på havbunden. ISA består af 167 medlemsstater og Den Europæiske Union og har mandat til at organisere, regulere og kontrollere alle mineralrelaterede aktiviteter på havbunden i Internationalt farvand, hvilket udgør cirka 50 procent af det samlede areal af verdenshavene.

I 2019 har ISA indgået kontrakter om efterforskning af manganknolde, og aktuelle udforskningsområder er i Clarion-Clipperton Zonen i Stillehavet, langs de midtatlantiske rygge og i Det Indiske Ocean – områder, der samlet dækker omkring 2 millioner km². Blandt de involverede lande er Kina, Indien, Sydkorea, Rusland og Stillehavsøstaterne samt Storbritannien, Frankrig, Belgien og Tyskland. På det seneste har der været stor interesse for muligheden for at udnytte havbundens ressourcer i det arktiske hav, der grænser op til Canada, Grønland, Island, Norge, Rusland og USA. Mineralefterforskning og -udvindingsaktiviteter i ethvert havbundsområde, der ikke tilhører disse stater, vil falde ind under ISA-jurisdiktion.

Videre læsning:
Om *JPI Ocean project*: miningimpact.geomar.de

Julia m.fl. har skrevet om deres oplevelser ombord på forsknings-skibet Sonne: www.oceanblogs.org/eadsm

Paulikas, D. et al (2022): Deep-sea nodules versus land ores: A comparative systems analysis of mining and processing wastes for battery-metal supply chains. *Jour. of Industrial Ecology*.

Is Mining The Ocean Bottom For Metals Really Better Than Mining On Land? *Forbes*, 24. Feb 2021

Mineral Resources of the Deep Sea: Formation, Potential and Risks. *GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany, 2020. 36 pp*